POLISH HYPERBARIC RESEARCH 2(67)2019
Journal of Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society
Faculty of Mechanical and Electrical Engineering of the Polish Naval Academy

ANALIZA KONTEKSTU PRZY PROJEKTOWANIU TECHNOLOGII

Ryszard Kłos

Akademia Marynarki Wojennej Zakład Technologii Prac Podwodnych w Gdyni

STRESZCZENIE

W poprzednim artykule opisano nową metodykę[1] podejścia przy pracach nad technologią wykorzystania aparatu nurkowego typu SCR CRABE SCUBA[2]. Jednak po jego publikacji nadeszły liczne pytania dotyczącymi genezy podjętych badań, także od partnerów zagranicznych wykorzystujących ten sam aparat nurkowy. Podjęcie prac nad zmianą technologii wykorzystania poprzedzono analizami, które były dostępne jedynie osobom zaangażowanym w proces decyzyjny. Pokazywanie wszystkich szczegółów procesu decyzyjnego może być nużące, lecz ich nie pokazanie w ogóle może budzić uzasadnione wątpliwości dotyczące celowości co do prowadzenia długotrwałego cyklu badań.
W artykule pokazano jedynie wstępne analizy. Konieczność ich przeprowadzenia wynikała ze szczególnych wymagań dla technologii[3] wojskowych, które powinny być możliwie szeroko oparte na wiedzy. Podejście oparte na wiedzy ze swej natury umożliwia ciągłe poprawianie adekwatności dokonywanych predykcji, szacowanie poziomu zagrożenia przy zdiagnozowaniu odchyleń od powtarzalności czy precyzji modelu oraz możliwość dostosowywania technologii do zmieniających się wymagań użytkownika wynikających z uwarunkowań taktycznego jej wykorzystania.
Słowa kluczowe: aparat nurkowy o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego/Semi-Closed Circuit Rebreather, modelowanie procesu dekompresji/modelling process of decompression.

ARTICLE INFO

PolHypRes 2019 Vol. 67 Issue 2 pp. 7 - 58
ISSN: 1734-7009 **eISSN:** 2084-0535
DOI: 10.2478/phr-2019-0005
Strony: 52, rysunki: 1, tabele: 5
page www of the periodical: www.phr.net.pl

Publisher
Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

Typ artykułu: **oryginalny**

Termin nadesłania: 13.02.2019 r.
Termin zatwierdzenia do druku: 20.04.2019 r.

WSTĘP

Sposoby pozyskiwania wiedzy, różnice w podejściu analitycznym i holistycznym do rozwiązywaniu sytuacji problemowych oraz podejście procesowe przy opracowywaniu technologii przedstawiono w zarysie we wcześniejszym artykule [1]. Zagadnienia te nie będą tutaj powtórnie przytaczane czy rozwijane[4].

CEL PROCESU NURKOWANIA

W każdym projekcie powinny być zdefiniowane założenia dotyczące jego celu, propozycji procesu służącego do jego osiągnięcia[5], określenia[6] minimalnej i optymalnej struktury dla proponowanego systemu mogącego zapewnić jednoznaczną, stabilną i efektywną realizację proponowanego procesu z uwzględnieniem wpływu na środowisko i wpływu środowiska na system oraz przebiegający w nim proces.

Początkowo za nurkowania uważano jedynie procesy, w których organizm nurka był wystawiany na ciśnienie, zaś nurkowania przy wykorzystaniu skafandrów jedno-atmosferycznych uważano za wykorzystanie pojazdu podwodnego. Obecnie, ze względu na wymagane wyszkolenie i konieczność realizacji zadań w osamotnieniu, mianem nurka określa się także akwanautę wykorzystującego skafander jedno-atmosferyczny.

Dla procesu nurkowania można ustanowić różne cele ich prowadzenia. Zależnie od oczekiwanego celu stanowiącego efekt końcowy procesu nurkowania należy ustanowić odpowiedni system, który będzie w stanie zapewnić trwałe podtrzymanie gotowości do realizacji celów nurkowania. Ze względu na cel procesu nurkowania można zastosować różne podziały, przykładowo można je podzielić na nurkowania:

- ekstremalne,
- sportowe,
- rekreacyjne,
- techniczne,
- zawodowe,
- ratownicze,
- wojskowe,
- itp.

Minimalny system zdolny do trwałego podtrzymania procesu nurkowania prowadzonego w wybranym celu stanowi jedynie konstrukcję teoretyczną. Minimalizowanie systemu najczęściej występuje przy realizacji nurkowań ekstremalnych, które są prowadzone w celu ustanowienia jakiegoś rekordu. W tych warunkach najczęściej zakłada się jedynie nieznaczne wzbogacenie systemu w minimalne środki bezpieczeństwa lub redundantność[7] niektórych elementów tego systemu[8]. Przyjęte elementy wychodzące poza minimalną strukturę systemu pozwalającego na realizację celu procesu nurkowania wynikają z analizy ryzyka i studium wykonalności.

Obrazowo można dobór minimalnej struktury systemu nurkowego prześledzić na opisywanym w historycznych książkach podróżniczych przykładzie nurkowań realizowanych przez poławiaczy gąbek.

Minimalny system potrzebny do realizacji procesu nurkowania składa się jedynie z przeszkolonego nurka. Element systemu szkolenia nurka można podzielić na dwa podsystemy: nauki pływania i nauki nurkowania z zatrzymanym oddechem. Ze studium wykonalności wynika jednak, że wyszkolony nurek będzie pracował efektywniej jeśli będzie wyposażony w nóż do odcinania gąbek, który zgodnie z analizą ryzyka może także posłużyć do wparcia ochrony nurka. Jeśli nurek jest dobrze wyszkolony i potrafi z zamkniętym oddechem wytrzymać dłuższą chwilę to z analizy efektywności dla procesu nurkowania w celu poławiania gąbek wynika, że należy dodatkowo wyposażyć go w przytraczaną siatkę do zbierania gąbek.

Ze studium wykonalności wynika, że gąbki raczej nie rosną blisko brzegu a efektywność pływania daleko od brzegu wpław jest raczej nie do zaakceptowania, należy zatem wyposażyć nurka w możliwość przemieszczania się łodzią. Skupiając się jedynie na systemie nurkowym należy łódź uznać za element otoczenia systemowego czyli kontekstu, który otacza rozpatrywany system nurkowy. Należy tutaj zauważyć, że w kontekście istnieją także inne elementy, które nie pozostają bez wpływu na rozpatrywany system nurkowań w celu poławiania gąbek, które powinny być brane pod uwagę przy studium wykonalności, jak: zapotrzebowanie rynkowe czy zagrożenie atakiem rekinów.

Późniejsze różnorodne analizy ryzyka, technicznej wykonalności czy ekonomicznej opłacalności, mogą dotyczyć zastosowania pompy lub kompresora powietrza, systemu podawania powietrza z systemem filtracji bądź bez niej, zastosowania reduktora zapotrzebowania lub nie, użycia maski, płetw aż do systemu ochrony zdrowia, ubezpieczenia społecznego czy emerytalnego. W taki sposób zdefiniowanie realizowanego celu przez ustanowiony proces może posłużyć do zdefiniowania struktury podtrzymującego go systemu z uwzględnieniem wpływu otoczenia na system i wpływu systemu na otoczenie.

Dla zaproponowanego tutaj podziału, rozgraniczenie pomiędzy wymienionymi rodzajami nurkowań polega właśnie na określeniu różnych celów ich prowadzenia. Nurkowania ekstremalne prowadzone są najczęściej w celu bicia rekordów, lecz mogą wystąpić jako element akcji ratowniczej, czy naprędce zmienionego scenariusza taktycznego dla sytuacji bojowej. Typowe nurkowania ekstremalne mogą polegać na zaliczeniu na bezdechu maksymalnej głębokości przy wciąganiu nurka przez ciężar lub osiągania głębokości własnymi siłami przy użyciu płetw po wstępnym wepchnięciu na pewną głębokość przez drugiego nurka, bądź osiągnieciu jej samodzielnie. Nurkowania sportowe prowadzone są w celu rywalizacji. Przykładowo, mistrzostwa w łowiectwie podwodnym wcześniej polegały na łowieniu ryb w określonym czasie a obecnie stanowią najczęściej zawody fotograficzne. Nurkowania rekreacyjne prowadzone są dla przyjemności. Nurkowania techniczne zrodziły się z chęci wykorzystania specjalnego, skomplikowanego wyposażenia do prowadzenia nurkowań. Często są one realizowane, podobnie jak nurkowania ekstremalne do bicia rekordów głębokości, czasu pobytu pod wodą, czy prowadzenia eksploracji niektórych zakątków, jak wraki czy jaskinie. Nurkowania zawodowe polegają na wykorzystaniu różnego uzbrojenia technicznego do

prowadzenia komercyjnych prac podwodnych. Specyficznym rodzajem nurkowania zawodowego jest nurkowanie prowadzone w celu ratowania życia. Ratowanie mienia mieści się w typowym komercyjnym nurkowaniu zawodowym. Nurkowania w celu ratowania życia charakteryzują się inną dynamiką i determinacją niż inne typy nurkowania. Używane są też inne procedury i dodatkowe wyposażenie dla poszkodowanych. Nurkowania techniczne wyłoniły się z nurkowań wojskowych, lecz ich cel jest niemilitarny. Cele prowadzenia nurkowań wojskowych mogą być różnorakie, przykładowo w nurkowaniach bojowych cele są zazwyczaj inne niż przy nurkowaniach przeciwminowych MCM[9].

Zgodnie z celem procesu nurkowania stosuje się różne podejścia do budowy systemu zapewniającego niezakłócony, efektywny i bezpieczny przebieg tego procesu. Podczas prowadzenia prac podwodnych zarówno nurkowie, jak i kierownicy nurkowań wolą przeprowadzać dekompresję według reżimów o niskim poziomie ryzyka[10], dlatego do programów dekompresyjnych wprowadzono funkcję konserwatyzmu wykorzystującą, np. metodę prowadzenia obliczeń dla zawyżonych w stosunku do rzeczywistych zawartości gazów obojętnych, zawyżonej głębokości w stosunku do rzeczywistej, przyjmując dłuższy od rzeczywistego czas pobytu na głębokości czy stosując asymetryczny model dla nasycania/odsycania tkanek teoretycznych[11].

Niektóre programy wykorzystują więcej niż jeden z wymienionych sposobów lub ich kombinację celem zwiększenia bezpieczeństwa dekompresji. Takie sposoby postępowania nazywane są metodykami konserwatywnymi lub po prostu konserwatyzmem[12]. Wielkość konserwatyzmu jest często określana poprzez podanie o ile dłuższy i głębszy ma być przyjęty profil dekompresji w stosunku do rzeczywistego. Czasami można spotkać określenie konserwatyzmu wyrażone liczbowo, np.: w procentach odnoszonych do gradientu przesyceń[13]. Technologie nurkowe mogą być dzielone ze względu na konserwatyzm.

Przy nurkowaniach ekstremalnych technologię nurkowania dobiera się indywidualnie do nurka. Najczęściej pojęcie konserwatyzmu dla tego typu nurkowań nie występuje, gdyż typowym postępowaniem jest przekraczanie typowych granic bezpieczeństwa, do których odnosi się konserwatyzm. Zaistnienie wypadku nurkowego jest wkalkulowane w cel nurkowań ekstremalnych a zabezpieczenie związane jest z rozwinięciem systemów leczenia możliwie blisko miejsca organizacji nurkowań ekstremalnych.

W nurkowaniach technicznych często technologia jest dedykowana do zadania i do aktualnego stanu wytrenowania nurka. Często technologia, a zwłaszcza rozkłady dekompresji, są dobierane do aktualnego przebiegu nurkowania przez komputerowe systemy wspomagające proces nurkowania, przy uwzględnieniu zmian nie tylko głębokości i czasu pobytu, lecz także zmian temperatury, zużycia gazu czy zmiany nastaw poziomu konserwatyzmu. Nurkowania techniczne nie przekraczają granicy zerowego konserwatyzmu, jak to ma miejsce w nurkowaniach ekstremalnych. Odłamem nurkowania technicznego może być nurkowanie naukowe prowadzone w celu poznania środowiska wodnego, zarówno ożywianego jak i nieożywionego. Ze względu na fakt nurkowania naukowców, także zaawansowanych wiekiem, konserwatyzm jest dla nich dobierany indywidualnie na zawyżonym poziomie.

Przy nurkowaniach sportowych poziom konserwatyzmu przewyższa typowy poziom 30% konserwatyzmu stanowiący granicę dla nurkowań z bezpieczną, lecz forsowną dekompresją. Jest on świadomie uzgadniany i identyczny dla wszystkich uczestników nurkowania. Różnice tkwią w sposobie przygotowania do procesu nurkowania sportowego, który stanowi skrywany handicap poszczególnych zawodników.

Dla nurkowań rekreacyjnych poziom konserwatyzmu jest dobierany w taki sposób, aby zagrożenie chorobami nurkowymi DCI [14] było niższe niż 1% w rozumieniu szacowania, jak dla zagrożenia epidemiologicznego, dla całej populacji dopuszczonych do nurkowania poprzez sprawdzenie wypełnienia standardów medycznych [2]. Odłamem nurkowania rekreacyjnego jest nurkowanie rehabilitacyjne, rzadziej uprawiane w formie rehabilitacji medycznej[15], częściej w formie rehabilitacji społecznej[16].

W nurkowaniach zawodowych standardy medyczne są zazwyczaj bardziej rozwinięte i rygorystyczne niż w nurkowaniach rekreacyjnych. Konserwatyzm często ustalany jest na tym samym poziomie jak dla nurkowań rekreacyjnych, lecz nie dotyczy on już całej populacji mogącej nurkować, lecz wybranej, spełniającej wyższe wymagania niż przeciętny obywatel populacji nurków zawodowych. Jeśli przy nurkowaniach zawodowych zagrożenie chorobami nurkowymi DCI jest wyższe niż 1% w rozumieniu szacowania, jak dla zagrożenia epidemiologicznego, dla wybranej populacji spełniającej specjalne wymagania stawiane w standardach medycznych, to podobnie jak przy normalnych procedurach ochrony pracy nurkowie muszą wyrazić na odstępstwa świadomą zgodę a ponoszone ryzyko powinno być skompensowane zarówno w sposobie ochrony zdrowia jak i gratyfikacji finansowej.

Nurkowania ratownicze charakteryzują się nie tyle zwiększeniem zagrożenia wystąpieniem objawów chorób nurkowych DCI co zagrożenia wypadkiem technicznym na skutek awarii wykorzystywanego sprzętu[17]. Zwiększenie zagrożenia DCI jest dozwolone jedynie przy bezpośrednim ratowaniu życia ludzkiego[18]. Stąd najczęściej w akcji ratowniczej konserwatyzm utrzymywany jest na poziomie typowym dla nurkowań zawodowych. Dotyczy to oczywiście grupy ściśle dobranych i trenowanych nurków zabezpieczanych przez specjalistów różnych dziedzin, potrzebnych w akcji ratowniczej.

Nurkowania wojskowe charakteryzują się różnym poziomem zagrożenia możliwością wystąpienia chorób nurkowych DCI. Dla nurkowań EOD[19] stosuje się najczęściej takie same zasady jak dla nurkowań ratowniczych. Przy nurkowaniach MCM, zależnie od wagi misji, możliwe jest zaaprobowanie zagrożenia możliwością wystąpienia objawów chorób nurkowych DCI od poziomu nurkowań EOD do misji bojowych SRT[20] dla których typowe zagrożenie DCI jest określane na poziomie[21] 5% w rozumieniu szacowania, jak dla zagrożenia epidemiologicznego, dla wybranej populacji spełniającej specjalne wymagania stawiane w standardach medycznych[22].

Widać stąd, że wojskowe technologie nurkowe powinny być możliwie szeroko oparte na wiedzy. Inne technologie można kupić. Nawet przy nurkowaniach technicznych szersza, lecz dostępna wiedza jest wystarczająca do spracowania decyzji o podejmowanym ryzyku, na które pozwala zastosowany algorytm zaszyty w pamięci komputerów do wspomagania podejmowania decyzji o zastosowanym procesie dekompresji.

Realizowany projekt dotyczy technologii nurkowań MCM z wykorzystaniem niezależnego aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego SCR CRABE SCUBA, realizowanych w szerokim zakresie głębokości, jako elementu systemu wojny minowej. Nurkowania powinny być prowadzone od powierzchni do ok. 80 mH_2O a do pokrycia różnych zakresów głębokości wykorzystywany będzie tlen do dekompresji oraz różne mieszaninyazotowo-tlenowe, do

głębokości[23] 50 mH_2O, zaś głębiej mieszaniny na bazie helu[24]. Szczególnie istotnym wydaje się kontekst wykorzystania technologii nurkowych jako elementów systemu wojny minowej. Należy dążyć do tego aby konserwatyzm technologii był możliwie efektywny i stwarzał zagrożenie w granicach[25] (1;3)% w rozumieniu szacowania go, jak dla zagrożenia epidemiologicznego, dla wybranej populacji spełniającej specjalne wymagania stawiane w standardach medycznych.

KONTEKST FIZJOLOGICZNY

Podstawowe wymagania dotyczące prowadzenia operacji nurkowych wykonywanych w niezależnych aparatach nurkowych wynikają z zagrożenia chorobą dekompresyjną DCS[26]oraz toksycznością tlenową[27] CNSyn.

Wśród podstawowych parametrów dekompresyjnych można wyróżnić następujące założenia do ekspozycji:

- maksymalna, planowana głębokość ekspozycji hiperbarycznej,
- czas ekspozycji na maksymalnej głębokości,
- użyty czynnik oddechowy,
- predyspozycja nurka do przechodzenia ekspozycji hiperbarycznej,

Nie zawsze nurkowanie planowane jest z pobytem na jednej głębokości ekspozycji hiperbarycznej H. Najczęściej głębokość H stanowi skomplikowaną zależność funkcyjną od czasu ekspozycji t: $H = f(t)$. Jednak często, bez szkody dla efektywnego planowania dekompresji, zależność $H = f(t)$ daje się przybliżyć parą parametrów: maksymalną głębokością ekspozycji H_{max} i czasem pobytu na maksymalnej głębokości $t(H_{max})$. Niezwykle ważnym parametrem do planowania skutecznej, bezpiecznej ekspozycji i efektywnej dekompresji jest ciśnienie cząstkowe tlenu p_i, które najczęściej jest funkcją czasu ekspozycji i dekompresjit: $p_i = f(t)$. W czasie zanurzenia i pobytu na dnie, najczęściej wykorzystywana jest jedna mieszanina operacyjna zasilająca aparat nurkowy, lecz zależnie od jego konstrukcji może on utrzymywać ciśnienie cząstkowe tlenu p_i w węższych lub nawet bardzo szerokich granicach.

Planowanie wykonywania długotrwałej pracy ciężkiej w operacjach nurkowych poza strefą saturacji jest kłopotliwe, ze względu na brak możliwości zaprojektowania adekwatnej dekompresji [3]. Ciężka praca uruchamia konieczność adekwatnej odpowiedzi organizmu nurka. Najczęściej odpowiedzią jest włączenie przemian anaerobowych powodujących powstawanie kwasu mlekowego w mięśniach, który zakwaszając krew powoduje spadek efektywności transportu tlenu przez hemoglobinę [4].

Efekty te różnią się osobniczo θ a dla tego samego osobnika silnie zależą od aktualnego wytrenowania $\theta_i = f(t)$, przygotowania[28] czy nawet nastawienia do nurkowania. Trudno niektóre parametry osobnicze uwzględnić przy planowaniu adekwatnej dekompresji w odniesieniu do populacji. Przy nurkowaniach saturowanych przeznacza się czas na stabilizację przed procesem dekompresji. Czas ten zależy od typu wykonanych wcześniej prac i może wynieść nawet 2 dni.

Jak wspomniano, przy uproszczonym podejściu do procesu planowania dekompresji wykorzystuje się dwa parametry: osiągniętą głębokość maksymalną ekspozycji H_{max} i czas ekspozycji na maksymalnej głębokości $t(H_{max})$, liczony od momentu rozpoczęcia zanurzenia do rozpoczęcia procesu dekompresji. Maksymalna głębokość ekspozycji H_{max} może być osiągnięta choćby przez chwilę[29] a rozpoczęcie procesu dekompresji liczone jest od chwili, gdy ciśnienie już tylko może się zmniejszać z wyjątkiem wymaganych postojów na stacjach dekompresyjnych. Jeśli postoje na stacjach dekompresyjnych ulegną wydłużeniu może ulec zmianie także plan dalszej dekompresji. Ten sposób planowania procesu dekompresji opiera się na procedurze doboru metodą najgorszych okoliczności. Takie postępowanie zwiększa konserwatyzm przyjętego postępowania dekompresyjnego w sposób zmienny, zależnie od warunków nurkowania i sposobu podejścia kierownika nurkowania do planowania dekompresji. Należy zwrócić uwagę, że nieuzasadnione nadmierne zwiększanie konserwatyzmu może spowodować nieefektywność procesu nurkowania ze względu na znacznie przewymiarowany czas procesu dekompresji. Zgodnie z tradycją Marynarki Wojennej RP projekt opierał się o dobór procesu dekompresji metodą najgorszych okoliczności.

Procesy dekompresji i kompresji mogą przebiegać też w warunkach stałego ciśnienia przy zmianie składu czynnika oddechowego [3]. Izobaryczne procesy dekompresji towarzyszą dekompresji tlenowej. Zastąpienie mieszaniny gazowej czystym tlenem powoduje wymywanie gazów inertnych przez tlen z tkanek. Tlen jest usuwany z organizmu, przede wszystkim na drodze metabolicznej konsumpcji. Zjawisko izobarycznej dekompresji zachodzi na tlenowych stacjach dekompresyjnych. Ze względu na swą toksyczność tlen może być zastosowany jedynie na stosunkowo płytkich stacjach dekompresyjnych. Na świecie uważa się, że dekompresję tlenową można rozpocząć od głębokości 12 mH_2O.

W Marynarce Wojennej RP istnieją długie tradycje zastosowania dekompresji tlenowej już od 15 mH_2O, jednak ze względu na zachowanie interoperacyjności w nurkowaniach przy wykorzystaniu SCR CRABE SCUBA dekompresja tlenowa została zaplanowana od 12 mH_2O, lecz przepłukanie przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego tlenem będzie następowało już od głębokości 15 mH_2O. Dekompresję można akcelerować także przez wykorzystanie mieszanin gazowych wzbogaconych w tlen. Mechanizm jest podobny a wykorzystanie takich mieszanin może rozpocząć się przed przejściem na dekompresję tlenową. Jednak możliwe jest zastosowanie innej mieszaniny niż jedynie wzbogaconej w tlen. Przykładowo zastąpienie Trymiksu przez Nitroks[30]. W takim przypadku nawet przy stałym ciśnieniu zewnętrznym Nitroks będzie wymywał hel z tkanek zastępując go azotem, czyli zamiana czynnika oddechowego będzie powodowała zjawiska dekompresji izobarycznej. Należy jednak zwrócić uwagę, że azot jest znacznie lepiej rozpuszczalny w tkankach zawierających tłuszcz niż hel, dlatego zaplanowanie długiego okresu dekompresji izobarycznej w przypadku zamiany czynnika oddechowego z Trymiksu na Nitroks może doprowadzić do wydłużenia procesu dekompresji zamiast akceleracji. Jeśli fakt ten nie zostanie uwzględniony to może dojść do objawów choroby dekompresyjnej DCS. Taki mechanizm choroby dekompresyjnej znany jest jako DCS indukowany procesem kontrdyfuzji [5-7].

Predyspozycja nurka do ekspozycji hiperbarycznej stanowi cały kompleks zagadnień do których można zaliczyć:

- budowę fizyczną,
- stan psychofizyczny przed nurkowaniem,
- budowę mentalną,
- aktualny stan wytrenowania,

- zakres stosowanych zasad higieny itd.

Dawniej budowa fizyczna nurka była podstawowym parametrem dopuszczającym go do służby wojskowej w charakterze nurka lub do pracy w charakterze nurka zawodowego. Wiązało się to z rodzajami skafandrów nurkowych. Za wysoki nurek nie mieścił się w skafandrze, zaś dla niskiego wzrostem nurka zrefowany skafander stwarzał zagrożenie. Przykładowo, pękniecie pasa krocznego w skafandrze klasycznym powodowało ucieczkę hełmu i brak możliwości upuszczania powietrza ze skafandra doprowadzając do wyrzucenia nurka na powierzchnię lub zawiśnięcia w toni na zakleszczonym o przeszkody podwodne wężu nurkowym. Obecnie istnieje możliwość wyprodukowania skafandra dopasowanego do nurka. Dawniej wymagana była silna budowa ciała dla nurka klasycznego, gdyż zakładany na powierzchni sprzęt ważył niewiele poniżej 100 kg i wymagana była wystarczająca siła fizyczna do jego nałożenia i wejścia do wody. Obecnie sprzęt i wyposażenie nurka zawodowego jest znacznie lżejsze, choć nadal wymaga niemałej siły fizycznej do jego założenia i poruszania się w nim poza środowiskiem wodnym[31]. Także wykonywanie prac podwodnych, choć realizowane przy wykorzystaniu narzędzi i wsparcia różnego rodzaju sprzętem, wymaga niejednokrotnie angażowania znacznego wysiłku fizycznego tak, że niektóre prace muszą być wykonywane tylko w warunkach saturacji.

Wykorzystanie aparatów nurkowych o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego wymaga pewnych predyspozycji. Wpływające na poziom bezpieczeństwa nurkowania parametry fizjologiczne HF [32] oznaczane są tutaj symbolem θ. Dla aparatu nurkowego SCR CRABE SCUBA jest to przede wszystkim moduł oddechowy[33]ε.

Nie zawsze znane są przyczyny występowania niektórych fenomenów[34], które powinny stanowić punkt wyjścia do dalszych badań naukowych. Powszechnie uważa się, że nurkowie starsi wymagają bardziej konserwatywnych procedur dekompresyjnych, lecz u całkiem sporego odsetka nurków w wieku powyżej 45 roku życia obserwuje się znaczny wzrost odporności osobniczej na warunki forsownej dekompresji. Zjawisko to zaobserwowano przy monitorowaniu powstawania wolnej fazy gazowej w naczyniach żylnych podczas nurkowań eksperymentalnych, choć już wcześniej obserwowano przypadki odporności osobniczej na trudy dekompresji[35]. Zjawisko to nie występuje jedynie jako właściwość osobnicza θ_i, lecz potrafi zmieniać się wraz z aktualnym stanem psychofizycznym[36] nurka.

Wpływ nastawienia czy determinacji nie jest obserwowany jedynie przy nurkowaniu. Istnieje wiele wiarygodnych zdarzeń związanych z nastawieniem, jak występowanie u ludzi i zwierząt zjawiska ciąży urojonej. Istnieje pogląd, że nurka buduje w 80% jego budowa mentalna, szczególnie umiejętność efektywnego działania w stresie oraz odporność na wpadanie w stan paniki[37]. Istnieje także przekonanie o korelacji nastawienia z odpornością na ośrodkową formę toksycznego oddziaływania tlenu CNSyn. Próbowano także forsować pogląd, że głęboka świadomość pochodząca z wiedzy stanowi przyczynek do łatwiejszego wpadania w stany lękowe rozwijające się aż do wybuchu paniki w sytuacji stresowej. Rzeczywiście obserwuje się, że gorzej wykształceni nurkowie wykazują większą odporność lecz, gdy dojdzie do przełamania bariery strachu, to rozwój sytuacji stresowej do wybuchu paniki ma u nich przebieg niezwykle gwałtowny.

Doświadczeni kierownicy nurkowania starają się zdobyć zaufanie nurków, aby stać się ich powiernikami, co ułatwia im ocenę aktualnego stanu psychofizycznego nurka. Przy ocenie tego stanu nie należy lekceważyć żadnych, nawet minimalnych symptomów. Dobrą praktyką jest uzyskanie przez kierownika kontaktu wzrokowego z nurkiem[38] podczas przygotowania do nurkowania, przy jednoczesnym badaniu stanu napięcia mięśni, drżenia ciała[39] czy oceny akcji serca[40] itp. Ważne jest sprawdzenie koordynacji ruchowej po nałożeniu sprzętu[41].

Ważne jest wychwycenie symptomów przemęczenia, wczesnych objawów chorobowych, stresogennych itp., gdyż one rzutują w sposób bezpośredni na bezpieczeństwo dekompresji.

Przy powtarzaniu nurkowania ważne jest pozostałe po wcześniejszej dekompresji przesycenie gazami inertnymi[42] tkanek. Obniżanie wartości ciśnienia, jak podczas lotów samolotami rejsowymi czy śmigłowcami transportowymi, może powodować na tyle poważne zaburzenia równowagi w prężności gazu w tkankach, że może dojść do wystąpienia objawów choroby dekompresyjnej DCS. W projekcie nie zakładano badań nad możliwościami podejmowania nurkowań powtarzalnych[43], powtórzeniowych[44] oraz osiągnięcia stanu równowagi gazowej pomiędzy tkankami i atmosferą oddechową[45] na powierzchni[46], lecz podczas postępów prac takie badania mogą zostać przeprowadzone.

Oprócz treningu siłowego, zapewniającego dobrą tężyznę fizyczną, treningu gibkości, zapewniającego dobre rozciągnięcie mięśni[47], ważny jest trening adaptacyjny. Trening adaptacyjny jest ukierunkowany na przygotowanie nurka do przebywania w warunkach hiperbarycznych i przechodzenia dekompresji. Przyzwyczajanie organizmu poprzez udrożnienie toru wymiany gazowej pomiędzy tkankami i atmosferą oddechową przyczynia się do bezpieczeństwa nurkowania. W projekcie istotne będzie określenie zakresu takiego treningu oraz wytycznych do treningu siłowego czy gibkości.

Higiena życia i pracy nurka jest pojęciem szerokim, jak wspomniane już komplikacje wynikłe na skutek podejmowania forsownego wysiłku przed nurkowaniem. Ważnym elementem jest przechodzenie planowych treningów siłowych, wytrzymałościowych, rozciągających czy adaptacyjnych. Ważnym jest wspomniana już dbałość o odpowiedni wypoczynek oraz trening antystresowy. Przy trenowaniu istotna jest odpowiednio zbilansowana dieta ograniczająca możliwość odkładania się tkanki tłuszczowej, lecz zapewniająca odpowiedni ładunek energetyczny. Ważne jest dostarczanie odpowiednich mikroelementów oraz witamin w formie raczej naturalnej niż w postaci suplementów diety. Suplementy diety czy leki mogą powodować wtrącenia jąder kondensacji do krwi i przez to zwiększyć podatność na łatwiejsze tworzenie się wolnej fazy gazowej podczas dekompresji. Rozwiązania dotyczące tej problematyki nie będą jednak stanowiły celów cząstkowych projektu i muszą być rozwiązane w ramach innych działań.

Do podstawowych wariantów założeń dekompresyjnych można zaliczyć:

- wysiłek,
- komfort cieplny.

Zawsze należy liczyć się z możliwością wydatkowania dodatkowej, nieprzewidzianej pracy, przykładowo związanej ze zmianą sytuacji hydrologicznej wymuszającej pracę przeciwko prądowi wody. Dodatkowo wydatkowany wysiłek może doprowadzić do zachwiania komfortu cieplnego. Przykładowo, jeśli nurkowie przygotowali się do wydatkowania wysiłku lekkiego w zimnej wodzie ubierając odpowiednio dobrane ocieplacze, to w warunkach wydatkowania wysiłku mogą ulec przegrzaniu. Komfort cieplny można także utracić przekraczając granicę termokliny[48] czy w skutek wydłużenia pobytu pod wodą. Wcześniej wykonywany wysiłek, brak snu, lekkie infekcje, wcześniejsze przemarznięcie, przegrzanie czy przewianie są

niejednokrotnie przyczyną szybszego wychłodzenia nurka. Do przegrzania najczęściej dochodzi przed nurkowaniem[49], co później skutkuje szybszym wyziębianiem pod wodą. Dotyczyć to może przygotowanego do zanurzenia nurka zabezpieczającego oczekującego na stanowisku wyczekiwania, dlatego należy zwrócić uwagę na jego ochronę przed przegrzaniem, gdyż podczas akcji ratunkowej może okazać się na tyle wyczerpany, że będzie jedynie pogłębiał zagrożenie.

Mechanizm wpływu nadmiernego, długiego wysiłku podczas nurkowania czy przed nurkowaniem na dekompresję został zasygnalizowany już wcześniej. Komfort cieplny ma także niebagatelny wpływ na bezpieczeństwo dekompresji. Podczas dekompresji utrzymywany jest stan przesycenia gazami w metastabilnej równowadze. Każda zmiana temperatury powoduje zaburzenia tej równowagi. Zarówno, marznięcie podczas nurkowania a przechodzenie dekompresji powierzchniowej w ciepłej komorze dekompresyjnej, jak i przegrzanie podczas nurkowania a przechodzenie dekompresji w warunkach wychładzania powoduje zaburzenia tej równowagi, które mogą prowadzić do wystąpienia objawów choroby dekompresyjnej DCS.

Do podstawowych wariantów prowadzenia dekompresji można zaliczyć:

- reakcję na zanieczyszczenia czynnika oddechowego,
- reakcja na odchylenia od składu czynnika oddechowego,
- akceleracją procesu dekompresji,
- przerwanie procesu dekompresji,
- realizacja dekompresji powierzchniowej i kompensacyjnej,
- kumulowanie czasu dekompresji na stacjach głębszych,
- przedłużenie procesu dekompresji.

Zanieczyszczenie czynnika oddechowego jest zawsze niepożądane. Problemy związane z zanieczyszczeniem czynnika oddechowego zostały opisane wcześniej i nie będą tutaj analizowane [8]. W aparatach regeneracyjnych częstym zagrożeniem jest retencja ditlenku węgla CO_2 oraz pył emitowany przez wypełnienie pochłaniacza. Wydychany ditlenku węgla CO_2 może ulegać kumulacji w przestrzeni oddechowej na skutek złej pracy pochłaniacza spowodowanej jego złą jakością, wyczerpaniem, zjawiskiem kanalikowania nieoczyszczonego czynnika oddechowego przez złoże itp. Należy dążyć do współpracy z dostawcą gwarantującym utrzymanie wymaganej jakości sorbenta.

Oprócz tego, powinna być sprawowana odpowiednia kontrola laboratoryjna nad przechowywanym sorbentem. Zagadnienia te nie będą stanowiły zadań cząstkowych projektu, lecz ustanowione procedury SOP[50] wynikające z poprzednio prowadzonych prac będą zachowywane i w miarę konieczności rewidowane [9]. Pylenie wapna sodowanego związane jest z jego postacią. Niekiedy jest ono tabletkowane i wyjątkowo odporne na ścieranie i łamanie, innym razem jest luźno formowane w różnego kształtu wytłoczki [10].

Wprowadzono także niepylącą formę gdzie sorbent stabilizowany jest w podłożu z tworzywa sztucznego. Jednak najpopularniejszą formą występującą w sprzedaży jest wapno kruszone i segregowane na sitach. Taka forma jest podatna na pylenie cząstek odłamanych na skutek udarów mechanicznych, przykładowo w transporcie czy w czasie upakowywania pochłaniaczy. Dlatego sorbent powinien być wstępnie odpylany na sitach przed pakowaniem do pochłaniaczy a później pochłaniacz powinien być przedmuchany. Podczas transportu przygotowanych aparatów wapno w pochłaniaczu może podlegać wytrząsaniu i w ten sposób kruszeniu. Zjawisku temu towarzyszy nie tylko pylenie, lecz także tworzenie się kanałów umożliwiających przejście regenerowanego czynnika oddechowego przez pochłaniacz bez dostatecznego oczyszczenia. Należy zatem ostrożnie transportować aparaty. Zabezpieczeniem przed pyłem może być moczenie wewnętrznej warstwy węży oddechowych i w ten sposób tworzenie filmu wodnego na powierzchni wewnętrznej węża, do którego przyklejać się mogą pyły emitowane z pochłaniacza. Sorbenty CO_2 są najczęściej mieszaniną silnie żrących wodorotlenków i pyląc mogą powodować mikro poparzenia dróg oddechowych.

Ze względu na możliwość zbrylania, sorbent przechowywany jest w formie przesuszonej, która wykazuje mniejszą wydajność chemisorpcyjną ditlenku węgla CO_2. Dlatego przed użyciem należy go nawilżyć przez wykonanie kilku wydechów do pochłaniacza. Moczenie węży tworzy także środowisko do aktywowania wypełnienia pochłaniacza. Częściowe wyczerpanie sorbentu może nastąpić w skutek przechowywania go w częściowo nieszczelnych pojemnikach lub pochłaniaczu. Oprócz tego niedostateczna szczelność aparatu może podczas nurkowania spowodować powstanie silnie żrącego roztworu wodorotlenków, który może spowodować silne poparzenia dróg oddechowych.

Kumulujący się ditlenek węgla CO_2 w cyrkulującym czynniku oddechowym powoduje szereg efektów, jak: działanie toksyczne, zwiększenie akcji oddechowej, obkurczenie naczyń krwionośnych[51] na obwodzie ciała, rozkurczenie naczyń krwionośnych w mózgu powodujące zwiększenie mózgowego przepływu krwi przez co wzmaga wrażliwość na ośrodkową formę toksyczności tlenowej CNSyn [4].

Wpływ generalnej zmiany składu czynnika oddechowego na dekompresję omówiono przy okazji omawiania dekompresji izobarycznej oraz zjawisk kontrdyfuzji. Przy projektowaniu ekspozycji hiperbarycznych, a szczególnie rozkładów dekompresji, niezwykle istotnym jest uwzględnienie istniejących fluktuacji składu wdychanego przez nurka czynnika oddechowego. Jest to szczególnie istotne dla aparatów o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego, gdzie występuje dynamiczne mieszanie się świeżego premiksu ze zregenerowanym czynnikiem oddechowym.

Nawet przy dekompresji tlenowej, nigdy nie zakłada się, że nurek będzie oddychał czystym tlenem. Obecnie można zastosować tlen o wysokiej czystości[52], gdyż jest on osiągalny za rozsądną cenę, lecz taki gaz daje możliwość realizacji dekompresji w aparatach o otwartym obiegu czynnika oddechowego[53]. W aparatach nurkowych o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego występują problemy z efektywną wentylacją przestrzeni oddechowej tlenem oraz płukaniem z organizmu gazów inertnych kumulujących się w obiegu wdychanego przez nurka czynnika oddechowego. Stąd zagadnienia wentylacji muszą uwzględniać te zjawiska a założenia związane z efektywnością procesu wentylacji muszą być walidowane podczas nurkowań eksperymentalnych. Zagadnienia wentylacji przestrzeni oddechowej aparatu SCR CRABE SCUBA zarówno premiksem jak i tlenem są problemami kluczowymi dla projektu, dlatego stanowią główną kanwę prowadzonych badań. W projekcie należało wziąć pod rozwagę:

- czas oddychania z aparatu na powierzchni przed rozpoczęciem procesu nurkowania,
- skuteczności płukania przestrzeni oddechowej świeżym premiksem podczas procesu zanurzania,
- wpływ płukania organizmu z gazów obojętnych[54] na skład czynnika oddechowego wdychanego przez nurka,

- skuteczność płukania przestrzeni oddechowej świeżym premiksem podczas pobytu na dnie[55],
- skuteczność płukania przestrzeni oddechowej świeżym premiksem przed podjęciem procesu wynurzania,
- konieczność płukania przestrzeni oddechowej świeżym premiksem na stacjach dekompresyjnych,
- skuteczność procesu wymiany czynnika oddechowego na tlen przed podjęciem dekompresji tlenowej,
- konieczność płukania przestrzeni oddechowej świeżym tlenem na stacjach dekompresji tlenowej.

Model wentylacji przestrzeni oddechowej aparatu SCR CRABE SCUBA stanowi główną podstawę planowania bezpiecznych ekspozycji hiperbarycznych i późniejszej dekompresji. Ocena skuteczności procesu wentylacji powinna być kontynuowana podczas treningów na symulatorze hiperbarycznym, gdzie można zebrać wiarogodne dane z procesu nurkowania. Baza danych z takich nurkowań stanowi podstawę do budowania postępu przez wiedzę oraz ważny element monitoringu bezpieczeństwa nurkowania, na którym powinna opierać się okresowa analiza bezpieczeństwa prowadzenia operacji nurkowych. Skuteczność płukania przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego stanowi ważny element oceny wyszkolenia nurków. Umiejętność stosowania procedur płukania przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego powinna być periodycznie sprawdzana podczas obowiązkowych treningów na symulatorze hiperbarycznym.

Najczęściej wykorzystywaną procedurą akceleracji procesu dekompresji jest dekompresja tlenowa. Powszechnie uważa się, że akceleracja taka stanowi 2,5 krotne skrócenie czasu dekompresji przy zastosowaniu mieszaniny operacyjnej [11-12]. Ze względów bezpieczeństwa parametr ten powinien być uściślony dla konkretnego przypadku jego wykorzystania lub zaokrąglony celem uproszczenia systemu[56]. Jednak zaokrąglanie prowadzi do mniej efektywnych[57] rozkładów dekompresji, stąd może istnieć potrzeba generacji dwóch, bądź większej liczby tabel, przykładowo: szkolnych, treningowych, bojowych wykorzystywanych na ćwiczeniach, bojowych wykorzystywanych w czasie działań wojennych, ekstremalnych wykorzystywanych w operacjach antyterrorystycznych itd., różniących się zagrożeniem wystąpieniem objawów choroby ciśnieniowej DCS czy ośrodkowej formy zatrucia tlenowego CNSyn.

Akceleracja dekompresji może dotyczyć sytuacji awaryjnych, jak konieczność pominięcia niektórych stacji dekompresyjnych w przypadku wystąpienia urazów czy utracie czynnika oddechowego. Takie postępowanie musi być połączone z przygotowanym wcześniej odpowiednim działaniem kompensacyjnym.

Dekompresja kompensacyjna może polegać na ekspozycji tlenowej w warunkach normobarycznych lub hiperbarycznych, jak podczas stosowania procedury dekompresji powierzchniowej[58]. Dalsze rozwinięcie tej problematyki oraz kumulowanie czasu dekompresji na stacjach głębszych będzie omówione jako kontekst realizacji procesu dekompresji.

Ze względu na podniesienie bezpieczeństwa, tradycyjnie w Marynarce Wojennej RP przyjmuje się kilka scenariuszy, dla których przedłuża się proces dekompresji[59] w przypadku:

- wykonywania przez nurka ciężkiej pracy pod wodą,
- zmarznięcia nurka podczas nurkowania i dekompresji,
- gdy nurkowanie jest jednym w serii nurkowań,
- gdy nurek jest niewytrenowany lub posiada osobnicze predyspozycje do zapadania na chorobę ciśnieniową DCS,
- otyłości lub gdy masa nurka przekracza 80 kg.,
- gdy nurek jest w wieku powyżej 40 lat.

Jeżeli zostanie zdiagnozowane jedno z powyższych utrudnień podnosi się konserwatyzm podejścia do procesu dekompresji poprzez zastosowanie dekompresji wydłużonej. Dekompresja wydłużona polega na przyjęciu następnego, dłuższego czasu nurkowania z tabeli dla tej samej głębokości[60]. Jeżeli zajdą dwie z wymienionych okoliczności zwiększa się czas nurkowania poprzez przejście o dwie linijki niżej. Przy zaistnieniu większej liczby przypadków utrudniających nie uwzględnia się ich i postępuje tak, jakby zaistniały tylko dwa utrudnienia. Zatem dwie ostatnie linijki dozwolonych czasów pobytu na dnie, dla każdej głębokości występującej w tabeli dekompresyjnej, pełnią rolę czasów awaryjnych stosowanych wyłącznie w procedurze dekompresji wydłużonej. Zwraca się uwagę także na inne czynniki wpływające na zwiększenie zagrożenia możliwością wystąpienia objawów choroby ciśnieniowej DCS – tab. 1.

Zadaniem projektu było opracowanie technologii nurkowań punktowych. Takie podejście wymaga zarówno opracowania technologii nurkowań z planowanym wysiłkiem[61], stwarzającym potencjalne zagrożenie wystąpieniem objawów choroby ciśnieniowej DCS, oraz technologii uwzględniającej brak wykonywania dodatkowej pracy przez nurka, gdzie głównym problemem jest zagrożenie możliwością wystąpienia objawów
ośrodkowego zatrucia tlenowego CNSyn.

Tab. 1

Ważniejsze czynniki mogące powodować wypadki dekompresyjne.

1.Zmniejszenie cyrkulacji krwi spowodowane: otyłością, przechłodzeniem organizmu, fizjologicznym obniżeniem efektywności krążenia (np. u ludzi w podeszłym wieku), wcześniejszymi chorobami układu krążenia lub nurkowymi, mechanicznym uciskiem (np. poprzez skafander nurkowy, brak zmian pozycji podczas dekompresji) itp.
2.Zwiększenie zawartości ditlenku węgla we wdychanym czynniku oddechowym lub jego kumulacji w organizmie (hiperkapnia) spowodowane, między innymi: złą kondycją nurka, wysiłkiem, występowaniem przestrzeni martwych w sprzęcie nurkowym, dużą gęstością czynnika oddechowego itp.
3.Duży wysiłek przed nurkowaniem oraz zakwaszenie mięśni powstałe po wysiłku. Zaleca się stosowanie 3-6 godz odpoczynku przed nurkowaniem (zależnie od warunków przyszłego nurkowania), oraz obowiązuje absolutny zakaz nurkowania nurka zmęczonego.
4.Konsumpcja alkoholu przed nurkowaniem i przed zakończeniem dekompresji (także podczas obowiązkowego odpoczynku na powierzchni, po nurkowaniu, gdy zachodzi powierzchniowa dekompresja izobaryczna). Alkohol zmniejsza napięcie powierzchniowe krwi, przez co ułatwia formowanie się pęcherzy gazowych. Zaleca się, aby *12 godz* przed i *12 godz* po nurkowaniu, nie spożywać napojów zawierających alkohol.

Tab. 1 kont.

Ważniejsze czynniki mogące powodować wypadki dekompresyjne.

5.Dehydratacja (odwodnienie) jest często bagatelizowana jako czynnik mogący powodować problemy dekompresyjne. Ignorowanie dehydratacji może jednak doprowadzić do powstania problemów dekompresyjnych, pomimo zachowania innych zaleceń. Najczęściej odwodnienie powstaje w następujących przypadkach: −Przy długotrwałym nurkowaniu w słonej wodzie w skafandrze typu mokrego. Następuje wtedy utrata wody poprzez osmozę (szczególnie ważne przy użyciu skafandrów ogrzewanych wodą w systemie otwartym). −Ciśnienie hydrostatyczne może powodować zwiększoną diurezę. −Przechłodzenie organizmu może powodować zwiększoną diurezę. −Podczas oddychania suchym czynnikiem oddechowym następuje odwodnienie na skutek parowania. −Kofeina, teina i alkohol powodują zwiększoną diurezę. −Niektóre grupy leków powodują dehydratację, a wiele zwiększoną diurezę. Nurkujący mogą zażywać lekarstwa jedynie pod kontrolą lekarza. −Strach i napięcie nerwowe mogą powodować zwiększoną diurezę. Podniesienie poziomu płynów w organizmie (rehydratacja) jest wskazana celem podniesienia bezpieczeństwa nurkowania. Najlepiej w tym celu podawać wodę mineralną, witaminizowaną lub w ograniczonej ilości soki owocowe. Nurek na kilka godzin przed nurkowaniem powinien dużo pić. Hydratacja przed nurkowaniem powinna uwzględniać warunki nurkowania. Nie zawsze jest możliwe swobodne oddawanie moczu podczas nurkowania czy dekompresji. Jeżeli nurek przechodzi dekompresję w komorze suchej z możliwością oddawania moczu, należy płyny podawać także podczas dekompresji.
6.Urazy typu przerwania ciągłości tkanki. W miejscach uszkodzeńń może formować się wolna faza gazowa i to nie tyko w tych oczywistych przypadkach jak przy urazie ciśnieniowym płuc, ale także przy drobnych skaleczeniach skóry.
7.Nurkowanie podczas objawów złej predyspozycji fizycznej lub/i psychicznej, np.: objawy kaca, niewyspanie, zmęczenie, objawy towarzyszące menstruacji, bóle głowy, objawy chorobowe itp. Powodują one zmniejszenie koncentracji uwagi a przez to możliwość zaistnienia pomyłki np. podczas kontroli profilu dekompresji, pomiarów głębokości czy czasu pobytu itp.
8.Zażywanie witamin, środków od bólu głowy, doustnych środków antykoncepcyjnych, środków pobudzających czy antystresowych, aktywnych środków pochodzenia roślinnego np. herbat ziołowych, może być niezalecane przed nurkowaniem. Jednym z powodów szkodliwego działania takich środków może być „zanieczyszczenie" poprzez utrzymywanie się dużych stężeń środków chemicznych we krwi. Działanie takie może prowadzić do łatwiejszego formowania się w niej wolnej fazy gazowej. Niektóre środki chemiczne takie jak alkohol (alkohol jest składnikiem wielu leków płynnych np. syropów przeciwkaszlowych) powodują zmianę napięcia powierzchniowego krwi ułatwiając w ten sposób formowanie się wolnej fazy gazowej we krwi.
9.Należy uważać na różnego rodzaju implanty i nawet takie typowe środki jak wypełnienia leczonych zębów. Znane są przypadki indukowania się bólu zęba przy źle założonym lub nieprawidłowo dobranym wypełnieniu. W tych przypadkach należy zasięgnąć opinii swojego lekarza na temat możliwości uprawiania nurkowania a przy leczeniu zębów zaznaczać, że uprawia się nurkowanie.

KONTEKST ORGANIZACYJNY

W Marynarce Wojennej RP, przy realizacji niezależnych nurkowań w środowisku morskim, dla klasycznej dekompresji zaprojektowanej ze stacjami dekompresyjnymi co 3 mH_2O, technologia nurkowania powinna zapewniać proces dekompresji awaryjnej z możliwością odbycia ostatniej stacji dekompresyjnej na głębokości 6 mH_2O. Postępowanie takie może być przydatne przy zmianie wysokość fal w rejonie nurkowania lub podczas planowania nurkowania przy podwyższonym zafalowaniu rejonu. W takiej sytuacji możliwość utrzymania się nurka na głębokości stacji 3 mH_2O jest problematyczna. Ze względów organizacyjnych najlepiej przyjąć, że czas realizacji takiego procesu dekompresji awaryjnej powinien być taki sam jak dla dekompresji zasadniczej a pobyt na stacji 6 mH_2O powinien stanowić sumę czasu pobytu na stacji 3 mH_2O i 6 mH_2O.

W Marynarce Wojennej RP tradycyjnie wymaga się aby system dekompresji pozwalał na realizację procesu kompensacji utrudnionych warunków przechodzenia dekompresji, umożliwiał zastosowania dekompresji powierzchniowej, przewidywał zastosowanie dekompresji kompensacyjnej itp. System taki powinien składać się z procedur hiperbarycznych, w tym procedur leczniczych, oraz zawierać wymagane uzbrojenie techniczne i medyczne do ich przeprowadzenia. System ten powinien być uzupełniony o podsystem ewakuacji poszkodowanego nurka do specjalistycznego ośrodka hiperbarycznego czy szpitala. Układ elementów systemu zabezpieczenia realizacji procesów leczniczych może być zapożyczony, lub opracowany na nowo i dedykowany specjalnie systemowi prowadzenia prac nurkowych. Ze względu na wykorzystywanie sprzętu niezależnego SCUBA, system tabel rekompresji leczniczej TT[62] powinien przewidywać procedury lecznicze na wypadek „wyrzucenia" nurka ze znacznych głębokości z pominięciem stacji dekompresyjnych a w skutek tego eksplozywnej dekompresji.

Wykorzystanie aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego SCR i mieszanin o podwyższonej zawartości tlenu wymaga opracowania procesu rekrutacji nurków i utrzymania ich w kondycji. System musi uwzględniać parametry zdrowotne nurków. Tutaj przyjęto, że będą one zgodne z wymaganiami dla nurków wojskowych. Do procesu kwalifikacji można dodać także dodatkowe kryteria[63]. Przyjęty standard parametrów fizjologicznych nurka stanowi wskazówkę przy opracowaniu procedury realizacji efektywnego procesu dekompresji.

Zagrożenie wystąpieniem objawów choroby ciśnieniowej DCS przyjęto na wyższym poziomie niż dla nurków rekreacyjnych[64]. System może także zawierać procedury realizacji procesu dekompresji jak dla nurków rekreacyjnych, który będzie wykorzystywany podczas szkolenia i treningów.

Ze względu na fakt opracowania technologii dla procesu nurkowania z wykorzystaniem aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego SCR powinna ona zawierać opracowane i walidowane skuteczne procedury dla procesu płukania przestrzeni oddechowej aparatu. Technologia powinna zakładać, że nie będzie potrzeby realizacji procesu przepłukania przestrzeni oddechowej aparatu podczas pobytu na dnie. Zawsze będzie można jednak zastosować skuteczną procedurę płukania przy podejrzeniu utraty kontroli nad składem czynnika oddechowego, którym oddycha nurek. Procedury te podwyższają zawartość tlenu w obiegu stąd powinien być sprawdzony ich wpływ na możliwość wystąpienia ośrodkowego zatrucia tlenowego CNSyn.

Ważnym parametrem operacji nurkowej jest możliwość obciążania nurka pracą. Wartość obciążenia pracą jest powiązana z procesem wentylacji przestrzeni oddechowej aparatu, a także z procesem dekompresji i narastania zagrożenia ośrodkową toksycznością tlenową CNSyn. Przyjęto tutaj obciążenie pracą średnio-ciężką[65] oraz spoczynek[66]. Nie można także pominąć wpływu ochrony cieplnej nurka na proces dekompresji.

Z analizy ryzyka wynika konieczność stosowania podsystemów awaryjnego oddychania. Systemy awaryjnego oddychania mogą opierać się o możliwość przejścia na oddychanie z integralnego zestawu butlowego z wykorzystaniem redundantnego[67] systemu oddechowego. Taki proces zabezpiecza przed utratą kontroli nad zasadniczym systemem oddechowym, nie zaś przed utratą zapasu czynnika oddechowego. Z punktu widzenia planowania procesu realizacji ekspozycji i późniejszej dekompresji, zastosowanie awaryjnego systemu oddechowego o innej zasadzie działania niż system zasadniczy powinno uwzględniać zmiany w zagrożeniu tlenową toksycznością ośrodkową CNSyn. Jeśli założy się konieczność opracowania procedur użycia systemów oddechowych niezależnych od używanego aparatu nurkowego[68] należy także uwzględnić fazę nurkowania, dla której możliwe będzie przejście na dekompresję awaryjną.

Dla zabezpieczenia opisanych procesów zasadniczych i awaryjnych będzie potrzebny minimum[69] system składający się z:

- procedur kwalifikacji do nurkowania z wykorzystaniem przewidzianego aparatu nurkowego oraz mieszanin oddechowych,
- specjalnie zaprojektowanej i walidowanej procedury dekompresji podstawowej wraz z zasadami obciążania nurka pracą,
- specjalnie zaprojektowanych i walidowanych procedur dekompresji awaryjnej,
- procedury płukania przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego z uwzględnieniem wzrostu zagrożenia możliwością wystąpienia objawów ośrodkowej toksyczności tlenowej CNSyn,
- zapożyczonych lub nowo opracowanych procedur leczniczych na wypadek wystąpienia chorób nurkowych DCI,
- wyposażenia hiperbarycznego i medycznego do zabezpieczenia procesu leczenia chorób nurkowych DCI i innych możliwych przypadków chorobowych,
- podsystememu transportu do ośrodka hiperbarycznego,
- procedury szacowania zagrożenia ośrodkową toksycznością tlenową CNSyn,
- integralnego podsystemu awaryjnego oddychania z aparatu nurkowego,
- awaryjnych aparatów nurkowych,
- podsystemu ochrony cieplnej nurka.

Jeśli zostanie wprowadzone wymaganie akceleracji[70] podstawowego procesu dekompresji poprzez wykorzystanie tlenu na ostatnich stacjach dekompresyjnych, to system musi zostać dalej rozbudowany nie tylko o walidowaną procedurę dla procesu dekompresji tlenowej, lecz także o elementy wynikające z analizy ryzyka przeprowadzonej dla tego procesu.

Procedura prowadzenia procesu dekompresji będzie wymagała określenia na jakim etapie można przejść bezpiecznie na dekompresję tlenową ze względu na odbytą już ekspozycję i podwyższone ciśnienie cząstkowe tlenu przy uwzględnieniu wynikającego stąd wzrostu zagrożenia ośrodkową toksycznością tlenową CNSyn.

Niezależnie od momentu czasu i głębokości przejścia na dekompresję tlenową należy poszukiwać efektywnej procedury dla procesu płukania przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego tlenem. Bezpośrednio od jej skuteczności zależeć będzie algorytm akceleracji dekompresji. Oczywiście należy rozpatrzyć sposób powtórnego przejścia w dowolnym momencie z dekompresji tlenowej na dekompresję z wykorzystaniem mieszaniny gazowej[71].

Najlepiej, jeśli przeliczenie czasu dekompresji pomiędzy procesem dekompresji z wykorzystaniem mieszaniny oddechowej oraz tlenu będzie odbywało się według prostej reguły. W takim przypadku wystarczy podać czasy pobytu na stacjach dla zasadniczego rozkładu dekompresji z zastosowaniem dekompresji tlenowej. Awaryjna dekompresja z wykorzystaniem mieszaniny oddechowej będzie stanowić przeliczenie czasów pobytu na stacjach przy oddychaniu tlenem. Zmiana czynnika oddechowego podczas dekompresji będzie wymagała opracowania zasad płukania przestrzenni oddechowej aparatu. Na wypadek awarii zasilania tlenem z aparatu nurkowego można także rozpatrzyć rozbudowanie systemu o zewnętrzne systemy oddychania tlenem[72].

Wykorzystanie systemu dekompresji tlenowej i awaryjnej dekompresji realizowanej przy oddychaniu cyrkulującą mieszaniną oddechową może się skomplikować, jeżeli nadal będzie utrzymane wymaganie, jak dla systemów morskich, z ostatnią stacją dekompresyjną na 6 mH_2O. Postawienie takiego wymagania dla wszystkich rozkładów dekompresji może spowodować, że proces dekompresji zasadniczej będzie zbyt konserwatywny i z tego powodu nieefektywny z punktu widzenia prowadzenia militarnych operacji nurkowych. W takim przypadku można zrezygnować ze stawiania takiego wymagania procesowi dekompresji awaryjnej i opracować dwa systemy dekompresji, wykorzystywane zależnie od tego czy nurkowanie będzie zabezpieczone w inne źródła zasilania tlenem na wypadek awarii zasilania z integralnego zestawu butlowego aparatu nurkowego czy też nie.

Dla systemów morskich atrakcyjny do wykorzystania wydaje się proces dekompresji powierzchniowej. Realizacja procesu dekompresji powierzchniowej umożliwia dla niektórych stacji dekompresyjnych przerwanie procesu dekompresji

w wodzie, szybkie wynurzenie i dotarcie do komory dekompresyjnej. Następnie sprężenie i odbycie reszty dekompresji już na powierzchni w komorze dekompresyjnej. Taki proces zmniejsza zagrożenie nurka związane z przebywaniem pod wodą, lecz naraża na stres związany z przerwaniem procesu dekompresji. Istnieją dowody na to, że przerwanie dekompresji może trwać do 7 min[73]. Jest to czas stosunkowo krótki na wynurzenie, dotarcie do komory dekompresyjnej, częściowe rozebranie nurka i powtórne sprężenie. Systemy dekompresji powierzchniowej, jako zasadnicze procedury realizacji procesu dekompresji, stosowane są przy nurkowaniach przewodowych, realizowanych z platformy nawodnej wyposażonej w komorę dekompresyjną[74]. Dla nurkowań niezależnych takie procedury pełnią jedynie funkcje awaryjne.

System prowadzenia prac podwodnych może nie przewidywać możliwości prowadzenia nurkowań powtarzalnych, powinien jednak normować czas odpoczynku jaki powinien upłynąć do powtórnego nurkowania.

KONTEKST SPRZĘTOWY

Do zasilania aparatów nurkowych o otwartym obiegu czynnika oddechowego najczęściej wykorzystywany jest premix, którym napełnione są butle zasilające regulator zapotrzebowania, choć możliwe są konstrukcje wytwarzające czynnik oddechowy podczas procesu nurkowania z komponentów gazowych[75]. Do pomyślenia jest konstrukcja aparatu o otwartym obiegu czynnika oddechowego zasilanego powietrzem i tlenem dopasowująca zawartość tlenu x_i w komponowanej dynamicznie mieszaninie powietrzno-tlenowej zależnie od głębokości nurkowania H, podobnie jak dla aparatów o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego, przykładowo w polskim SCR KSZYK SCUBA [13]. W takim przypadku należałoby znać funkcję realizującą algorytm mieszania gazów z komponentów $x_i = f(H)$ i na podstawie zawartości tlenu x_i ocenić jego ciśnienie cząstkowe p_i oraz ciśnienia cząstkowe innych gazów ($p_1 .. p_\bullet$). Ciśnienie cząstkowe tlenu p_i i innych gazów ($p_1 .. p_\bullet$) stanowi podstawę do szacowania dekompresji, ekspozycji na różne formy zatrucia tlenowego oraz toksycznego oddziaływania gazów[76].

Sytuacja ulegnie komplikacji, jeśli w procesie nurkowania będą zmieniane rodzaje czynników oddechowych[77]. Wtedy należy uwzględnić możliwość wystąpienia zjawiska kontrdyfuzji, także izobarycznej. Zarówno skład czynnika oddechowego ($x_1 .. x_\bullet, x_i$), jak i ciśnienia cząstkowe[78] komponentów czynnika oddechowego ($p_1 .. p_\bullet, p_i$), dla różnych typów aparatów nurkowych mogą być skomplikowanymi funkcjami głębokości H: $(x_1 .. x_\bullet, x_i) = f(H)$, $(p_1 .. p_\bullet, p_i) = f(H)$.

Aparaty o otwartym obiegu czynnika oddechowego dostosowują się do akcji oddechowej nurka, stąd ograniczenia związane z obciążeniem pracą W są związane z wytrenowaniem nurka i oporami stawianymi przez system oddechowy aparatu. Nie należy jednak planować wykonywania w nich wysiłku ciężkiego[79] podczas nurkowań niezależnych i przewodowych poza strefą saturacji z powodów podanych powyżej.

W aparatach o zamkniętym obiegu czynnika oddechowego, poza utrzymaniem składu czynnika oddechowego $(x_1 .. x_\bullet, x_i) = f(H, t)$ w funkcji głębokości H i czasu t, ważnym jest wiarogodność algorytmu utrzymania ciśnień cząstkowych gazów komponentów czynnika oddechowego $(p_1 .. p_\bullet, p_i) \cong$ idem w reakcji na wymuszenia. Przykładowo, na zmiany konsumpcji tlenuv na skutek zmiany obciążenia pracą W wymuszające najczęściej[80] zmiany strumienia tlenu $\dot{V}_i$ dozowanego do obiegu oddechowego: $\dot{V}_i = f(\dot{v})$.

Aparaty tego typu projektowane są tak, aby oszczędnie gospodarować zasobami czynnika oddechowego, stąd muszą w umiarkowanie szybki sposób realizować reakcję na wymuszenia. W przeciwnym razie, drobne wahania w zakresie utrzymania się na określonej głębokości ↑ H ↓ mogłyby spowodować nieuzasadnioną utratę czynnika oddechowego. Stąd odstępstwa od stanu stabilnego zawartości tlenu $x_i \neq$ idem, przykładowo przy szybkich zmianach obciążenia pracą[81] W, mogą powodować rozchwianie algorytmu utrzymywania składu wdychanego czynnika oddechowego ↑ $(x_1 .. x_\bullet, x_i)$ ↓ tak, że będzie on stwarzał dodatkowe zagrożenie. Algorytm realizowany w aparatach o zamkniętym obiegu czynnika oddechowego doskonale sprawdza się przy wydatkowanym stałym wysiłku lekkim. Stąd nawet przy wykorzystaniu bojowych aparatów tlenowych zakłada raczej planowanie niewielkiej szybkości przemieszczania się podczas misji bojowej. Planowany wysiłek powinien być względnie stały, zarówno oparty o czysto mechaniczne czy sterowane elektronicznie mechatroniczne aktuatory[82], aby system uzupełniania ubytków tlenu $x_i = f(\dot{v}, H)$ czy czynnika oddechowego $(x_1 .. x_\bullet) = f(H)$, był w stanie prawidłowo odczytać sytuację i odpowiedzieć adekwatnym działaniem.

W półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego świeży czynnik oddechowy miesza się dynamicznie ze zregenerowanym. Ustalenie funkcji $(x_1 .. x_{j\bullet}, x_i) = f(\dot{v}, H, t)$ składu $(x_1 .. x_\bullet, x_i)$ czynnika oddechowego wdychanego przez nurka w zależności od konsumpcji tlenu $\dot{v}$, głębokości H i czasu ekspozycji t stanowi podstawowy problem przy planowaniu bezpiecznej ekspozycji hiperbarycznej oraz późniejszej dekompresji. Najczęściej aparaty takie realizują predefiniowaną funkcję uzyskiwania składu czynnika oddechowego $(x_1 .. x_\bullet, x_i) = f(\dot{v}, H)$ na drodze mechanicznej[83].

Predefiniowanie algorytmu utrzymania stałego, założonego składu czynnika oddechowego wdychanego przez nurka $(x_1 .. x_\bullet, x_i) = f(\dot{v}, H) = \text{const}$ wymaga poczynienia założeń dotyczących parametrów osobniczych nurka θ oraz dozwolonych zakresów tolerancji dla odchyleń od tych wartości Δθ. Późniejszy dobór nurków wymaga sprawdzenia wypełnienia poczynionych założeń leżących podstaw projektowania algorytmu utrzymania założonego składu czynnika oddechowego wdychanego przez nurka $(x_1 .. x_j, x_i) = f(\dot{v}, H)$. Założone parametry osobnicze θ nie zawsze muszą być spełnione przez nurka, zwłaszcza gdy zachodzą takie fenomeny jak: sportowa wagotonia[84], bradykardia[85], znaczna rozbudowa tkanki mięśniowej, nadwaga, niedowaga itp. Stąd nurkowie powinni być wstępnie klasyfikowani do nurkowań przy wykorzystaniu aparatów nurkowych o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego ze względu na spełnienie założonych parametrów osobniczych θ przy konstruowaniu aparatu oraz technologii nurkowania.

Parametry osobnicze nurka θ ulegają zmianie wraz z wiekiem nurka i stopniem jego przygotowania/wytrenowania. Coroczne przesiewowe badania lekarskie nie skupiają się na tych zmianach. Ich zadaniem jest sprawdzenie ogólnego stanu zdrowia nie zaś poziomu wytrenowania czy spełnienia parametrów osobniczych θ leżących u podstaw bezpiecznego wykorzystania aparatów nurkowych. Stąd jednorazowe dopuszczenie do nurkowania przy wykorzystaniu specjalnych aparatów nurkowych może stracić sens wraz ze starzeniem się nurka lub aktualnym stanem jego wytrenowania[86]. Wydaje się dobrą praktyką sprawdzanie kluczowych dla bezpieczeństwa parametrów osobniczych nurka θ podczas każdego szkolenia na

wyższe uprawnienia nurkowe.

W procesie analizy bezpieczeństwa nurkowania w Marynarce Wojennej RP kluczowe jest odpowiednie przygotowanie kondycyjne, wydolnościowe i dekompresyjne nurka, gdyż parametry osobnicze nurka θ ulegają czasami znacznym fluktuacjom w skutek treningu adaptacyjnego lub jego zaniechania. Kontrola parametrów osobniczych nurka θ możliwa jest podczas obowiązkowych treningów, gdy odbywają się one przy wykorzystaniu wysiłkowych symulatorów hiperbarycznych, najlepiej hiperbarycznych symulatorów pływania[87], stanowiąc element zapobiegania sytuacjom potencjalnie niebezpiecznym.

Poziom bezpieczeństwa nurkowania ściśle zależy od zagrożenia stwarzanego przez wykorzystywany sprzęt, wyposażenie i technologię[88].

Przytoczony projekt skupia się na elemencie wyposażenia nurka jaki stanowi aparat nurkowy typu SCR CRABE SCUBA i wynikającym stąd zagrożeniem chorobą ciśnieniową DCS oraz ośrodkową formą toksyczności tlenowej CNSyn, w kontekście taktycznym wojny minowej MCM. Ważnymi elementami systemu jest wyposażenie nurkowe, jak dodatkowe systemy awaryjne XBS[89], skafandry nurkowe[90], analizatory gazowe[91], dekompresjometry itp.

KONTEKST TAKTYCZNY

W nurkowaniach wojskowych dominującą rolę odgrywa wykorzystanie sprzętu i wyposażenia nurkowego jako elementów strukturalnych systemu zapewniającego realizację procesów wynikających z przyjęcia określonej taktyki[92]. W rozumieniu zadań opisywanego projektu, nurkowania stanowią element systemu służący procesom zapewnienia ochrony sił własnych oraz bezpieczeństwa publicznego, które można podzielić na trzy podsystemy: MCM[93], EOD[94] oraz IED[95].

Działania MCM są procesami realizowanymi w systemie wojny minowej. Elementami systemu wojny minowej są specjalizowane jednostki pływające, dzielone tradycyjnie na: mine sweepers i mine hunters, lecz obecnie ten podział uległ zatarciu i można przyjąć, że w nowoczesnych marynarkach wojennych istnieje jedna klasa okrętu wojny minowej MCMV[96]. Do pierwszych zalicza się tradycyjne trałowce, które przechodząc nad polem minowym ciągną za sobą trały symulujące pola fizyczne okrętów wymuszając eksplozje miny lub podcięcie miny kotwicznej i rozstrzelanie jej na powierzchni. Drugi typ jednostek pływających rozwinął się do MCMV i stanowi wszechstronnie wyposażony okręt do realizacji procesów poszukiwania i neutralizacji min, zwłaszcza inteligentnych.

Zazwyczaj MCMV wyposażone są w autonomiczne pojazdy podwodne AUV[97]/UUV[98] do wykonania zwiadu w celu skolekcjonowania na mapie cyfrowej potencjalnych celów, które mogą być neutralizowane przez inne autonomiczne AUV lub kablowo sterowane pojazdy podwodne ROUV[99]. Pojazdy te mogą przenosić specjalne ładunki do neutralizacji podejrzanych obiektów, prowadzić ich „bombardowanie" specjalnymi ładunkami detonowanymi później zdalnie po odejściu pojazdu w rejon bezpieczny czy mogą stanowić sobą samobieżny ładunek wybuchowy. Najczęściej okręt wyposażony jest także w ROUV wyposażony w różnego rodzaju sensory do skanowania akwenu przed okrętem[100] oraz system holowany wyposażony w podobne sensory do skanowania dna. Na wyposażeniu takiej jednostki może być system inteligentnego trału symulujący pola fizyczne różnych klas okrętów. Jest on najczęściej holowany przez bazujący na MCMV nawodny pojazd bezzałogowy ASV[101]. Okręt stanowi element sieciocentrycznego[102] systemu większych sił przeciwminowych[103]. Jednostki takie posiadają zazwyczaj nurków przygotowanych do prowadzenia operacji ratowniczych[104] oraz jako jeden z elementów przeciwdziałania zagrożeniu ze strony min morskich.

Możliwe jest działanie nurków MCM z małych jednostek pływających operujących z brzegu lub przewożonych przez okręty[105]. Do ich zadań można zaliczyć rozpoznanie zwiadowcze, rzadziej prace likwidacyjne lub rozgrodzeniowe infrastruktury obrony obiektów hydrotechnicznych lub umocnienia brzegu[106].

Przedstawiany projekt w części dotyczącej działań MCM skupiając się nad działaniami ratowniczymi wyposażenia MCM, neutralizacji min inteligentnych oraz oślepienia elektronicznej infrastruktury obronnej obiektów morskich.

Działania EOD skoncentrowane są na usuwaniu niebezpiecznych ładunków wybuchowych, zarówno w postaci niezdetonowanych wojskowych ładunków wybuchowych UXO[107] jako pozostałości: wojennych, po bazach, ćwiczeniach wojskowych itp. Ze względu na zagrożenie działania te traktowane są jako działania bojowe realizowane także w warunkach pokoju[108]. Ważną odmianą tych działań są operacje IED skupiające się na przeciwdziałaniu UXO nierozpoznanego jako typowe wyposażenie wojskowe. Przynajmniej teoretycznie, działania EOD stwarzają mniejsze zagrożenie, gdyż sposób postępowania wynika ze skatalogowanych algorytmów postepowania z UOX pochodzenia wojskowego, które zazwyczaj posiadają możliwość dezaktywacji przy ustawieniu na nieusuwalność, czy systemu obrony obiektu inteligentnego. Niestety nawet stosunkowo prymitywne urządzenia IED mogą być nieusuwalne inaczej, jak przez ich kontrolowane zdetonowanie a jedynym przeciwdziałaniem zmniejszającym rażenie jest raptowne skierowanie fali uderzeniowej w inną stronę[109] lub zastosowanie osłon[110].

W niektórych przypadkach można próbować zastosować przeciw wykorzystanej elektronice jamming[111]. Często są to jednak stosunkowo prymitywne urządzenia elektryczne, które można próbować dezaktywować jedynie mechanicznie, przykładowo poprzez ich przestrzelenie różnymi pociskami[112] z armatki czy ładunkiem kumulacyjnym EFP[113], przepalenie ładunkiem termitowym, wytopienie materiału wybuchowego itp. Projekt ze swej natury związany jest z działaniami MCM oraz EOD pomijając działania IED, gdyż problematyka IED jest ściśle powiązana z parametrami pól fizycznych generowanych przez sprzęt nurkowy nie jest zaś ściśle z technologią nurkowania, choć procesy płukania przestrzeni oddechowej aparatu są niezwykle istotne z punktu widzenia emitowania szumu do akwenu.

Z punktu widzenia taktycznego analiza ryzyka ukierunkowana jest na akceptowanie innych poziomów zagrożenia niż akceptowany poziom zagrożenia wynikający z analizy ryzyka bezpieczeństwa operacji nurkowych. Jest to oczywiste gdyż oba podejścia odnoszą się do różnych celów. Jednak, przy taktycznym planowaniu operacji nurkowych należy uwzględniać uwarunkowania także dotyczące technologii nurkowania. Przykładowo, dla hipotetycznego scenariusza operacji desantowania, analiza ryzyka operacji skrytego rozpoznania i ewentualnego przygotowania rozgrodzenia podwodnych zapór

minowych przez nurków, z taktycznego punktu widzenia nakierowana jest na określenie prawdopodobieństwa skutecznego wykonania zadania na założonym poziomie ufności[114].

Ochrona szlaków żeglownych powinna być realizowana pewnie i szybko. Nie zawsze rozpoznanie min dryfujących przez jednostki nie posiadające wyposażenia do ich likwidacji może być skompensowane szybkim dojściem jednostki MCMV w rejon. W takim przypadku do likwidacji typowych min dryfujących można użyć nurków/pływaków VSW[115], którzy operując ze śmigłowców mogą być zrzucani do wody i umieścić zdalnie odpalany ładunek w jej pobliżu[116] lub na korpusie. Przeciwdziałanie minom inteligentnym na szlaku żeglownym nie zawsze może być realizowane przez pojazdy podwodne czy ładunki samobieżne ze względu na rejon czy przewidywany sposób działania miny[117]. Ponieważ pojazdy są łatwiej i z większym prawdopodobieństwem detektowane przez sensory takich min pozostaje użycie nurków, którzy posiadają dużą możliwość maskowania się na tle normalnych pól fizycznych występujących w akwenie. Nurek może precyzyjnie ustawić mały ładunek kumulacyjny odpalany nieelektrycznie, sieciować minę do czasu jej detonacji przez ładunek samobieżny lub przygotować do odholowania.

Podwodne działania IED właściwie zawsze realizowane są jedynie przez pływaków VSW czy nurków. Przeciwdziałanie atakom terrorystycznym czy działaniom w konflikcie asymetrycznym z użyciem nurków samobójców opiera się o użycie sprzętu bezzałogowego, załogowego, działania nurków SRT itp. Znajomość możliwości nurków w takich przypadkach jest niezwykle istotna, nie tylko ze względu na szacowanie ryzyka dla sił własnych, lecz także na szacowanie potencjału nurków terrorystów/samobójców.

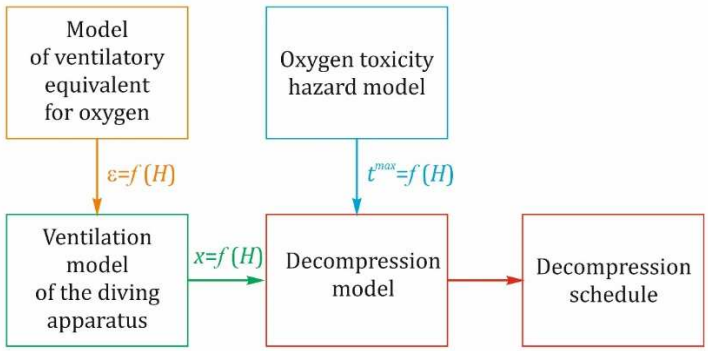
Podczas realizacji projektu należy niejako przy okazji zbierać dane do analizy ryzyka sytuacji taktycznej dla typowych scenariuszy operacji podwodnych w powiązaniu z zagrożeniem chorobą dekompresyjną DCS czy ośrodkowym zatruciem tlenowym CNSyn.

KONTEKST BADAWCZY

Od samego początku prowadzenia prac nad systemami dekompresji dla aparatów nurkowych w Polsce[118] zauważono, że postęp krajowy jest możliwy jedynie poprzez poszukiwanie modeli deterministycznych[119]. Konsekwentnie trzymanie się tego założenia przez trzy pokolenia badaczy doprowadziło do opracowania wiarogodnych i efektywnych, choć żmudnych metodyk postępowania[120].

W stosowanym podejściu badawczym sposób przewidywania zachowania ergonomicznego systemu nurek–aparat nurkowy został rozbity na szereg powiązanych ze sobą modeli[121] – rys. 1. Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań walidacyjnych wydaje się, że analityczne rozbicie na modele cząstkowe nie powoduje generowania istotnych błędów przy ich syntezie w model całościowy i wykorzystania według podejścia holistycznego.

Sposoby modelowania wentylacji za pomocą równań różniczkowych są znane od wieków. Są to stosunkowo proste równania, które mogą być rozwiązane metodami analizy matematycznej.



Rys. 1 Następstwo modeli.

Jednak ich przydatność do niedawna była kwestionowana ze względu na brak możliwości wystarczająco dokładnego ustalenia niektórych parametrów tych modeli[122]. Dlatego inżynieria wentylacji opiera się na modelach półempirycznych wywodzących się z przybliżonego rozwiązywania równania różniczkowego metodami analizy wymiarowej.

Pierwszy raz bariery związane z zastosowaniem podejścia deterministycznego do procesu wentylacji zostały przełamane ok. 15 lat temu. Umożliwiło to opanowanie modelowania deterministycznego wentylacji okrętu podwodnego, komory hiperbarycznej czy wyrobiska górniczego [14]. Wykorzystanie tych osiągnięć w inżynierii przemysłowej i sanitarnej mogłaby doprowadzić do zmiany podejścia do problemów wentylacji.

Wcześniejsze badania nad wentylacją aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu i stałym dozowaniu czynnika oddechowego skończyły się sukcesem ok. 20 lat temu [13]. Jednak aparaty tego typu zostały wycofane z użytku krajowego.

W obecnym podejściu do modelowania systemu nurkowania z wykorzystaniem aparatu SCR CRABE SCUBA zmieniono stosowane początkowo podejście holistyczne na analityczne. Podstawy opracowywania rozkładów dekompresji zostały oparte na kilku modelach pokazanych na rys. 1:

- zmian modułu oddechowego[123] ε w funkcji głębokości H: $\varepsilon = f(H)$,
- zmian w składzie czynnika oddechowego wdychanego przez nurka $(x_1 .. x_j, x_i) = f(H, \varepsilon, \varepsilon_k, x_w, t)$ w zależności od: głębokości H, modułu oddechowego ε, parametrów konstrukcyjnych dla półzamkniętej przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego ε_k, składu premiksux_w oraz czasu t,

- zmian w zagrożeniu tlenową toksycznością ośrodkową CNSyn w zależności od ciśnienia cząstkowego tlenu p_i i czasu ekspozycji t,
- projektowania dekompresji[124] jako funkcji czasu ekspozycji hiperbarycznej t oraz ciśnienia H przy uwzględnieniu wpływu czynników zakłócających, jak: temperatury T, wpływu poprzednich ekspozycji na dekompresję, wzrostu zagrożenia tlenową toksycznością ośrodkową CNSyn, obciążenia dodatkową pracą W, sekwencją zanurzenia i wynurzenia, przebytym transportem do miejsca zanurzenia, obciążeniem wysiłkiem przed i po nurkowaniu itp.

Funkcja $\varepsilon = f(H)$ zmian modułu oddechowego[125] ε w zależności od głębokości H nie jest kluczową z punktu widzenia wiarogodności[126] ustalenia wartości stabilnych zawartości tlenu x_s z modelu wentylacji. Stała się ona istotną, gdyż niespodziewanie pozostałe modele pokazane na rys.1 wyznaczane są ze znacznie większą wiarogodnością. Przy poszukiwaniu rozwiązań dla modelu różniczkowego wentylacji aparatu nurkowego zawierającego system worków umieszczonych jeden w drugim $\frac{\partial}{\partial t}(x_1 .. x_j, x_i) = f(H, \varepsilon, \varepsilon_k, x_w, t)$ moduł oddechowy ε zaczął pełnić rolę kluczową[127]. Spowodowało to konieczność przeprowadzenia badań naukowych nad wiarogodnym ustaleniem zależności modułu oddechowego $\varepsilon = f(H)$ od głębokości H.

Badania modułu oddechowego ε są opisane w dostępnym piśmiennictwie dla ciśnienia atmosferycznego, gdyż stanowią ważny wskaźnik wytrenowania sportowców stanowiąc podstawę wielu badań dotyczących medycyny wysiłku czy normowania pracy [15]. Dotychczasowe, bezkrytyczne przenoszenie wartości dla warunków normobarycznych do badań hiperbarycznych stanowiło barierę w adekwatnym opracowywaniu systemów nurkowych. Wyniki badań modułu oddechowego ε dla określonych sytuacji hiperbarycznych można poszukiwać w rzadkich wydawnictwach specjalistycznych [5-6]. Jednak przeniesienie tych wartości wiąże się nadal z obniżeniem wymaganej dokładności i precyzji modelowania wentylacji. Ustalenie zależności $\varepsilon = f(H)$ zmian modułu oddechowego ε w funkcji głębokości H dla predefiniowanych warunków, zrealizowano poprzez prowadzenie ekspozycji eksperymentalnych w warunkach symulowanych na możliwie reprezentatywnej grupie nurków eksperymentalnych[128].

Model wentylacji pozwala ustalić stabilną zawartości tlenu w funkcji głębokości: $x_s = f(H)|x_s(H, W) \equiv x_i = idem$, parametrów środowisko-wych i wysiłku. Po uwzględnieniu spotykanych fluktuacji Δx_s stabilnej zawartości tlenu x_s, dla ustalonych głębokości H i obciążenia pracą W, model ten stanowi wkład do modelowania dekompresji – rys. 1.

W aparatach o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego SCR zasilanego premiksem występuje względny spadek zawartości tlenu[129] od stężenia występującego w premiksie x_w do wartości stabilnej[130] x_s. Zjawisko to spowodowane jest uzyskaniem warunku równowagi przy mieszaniu się czynnika zregenerowanego ze świeżym. Dynamikę tego procesu można modelować podobnie jak inne procesy wentylacyjne [14].

Na podstawie wcześniejszych, wieloletnich badań można dojść do wniosku, że proces wentylacji przestrzeni oddechowej aparatu SCR CRABE SCUBA można wystarczająco dokładnie opisać w oparciu o równanie stanu gazu doskonałego. Równanie różniczkowe zbudowane na podstawie bilansu molowego można rozwiązać dokładnie. Podejście takie nie jest powszechnie stosowane ze względu na trudności spotykane z ustaleniem niektórych parametrów dla tego równania. Poprzez wieloletnie badania nad procesem wentylacji okrętu podwodnego, komór hiperbarycznych, wyrobisk górniczych itp., udało się zaproponować wiarogodne podejście do tej problematyki, stąd modelowanie oparto o w pełni deterministyczny, algebraiczny model analityczny.

Do badań nad procesem wentylacji aparatu nurkowego bez udziału ludzi wykorzystuje się stanowisko skumulowanych symulatorów: metabolicznej konsumpcji tlenu $\dot{v}$, akcji oddechowej $\dot{V}_E$ i głębokości H. Symulator jest pod wieloma względami oryginalnym w skali światowej rozwiązaniem powstałym w ramach wieloletnich badań własnych. Charakteryzuje się tym, że do symulowania konsumpcji tlenu $\dot{v}$ stosowane jest medium płynne, nie zaś gazowe jak w innych, podobnych rozwiązaniach technicznych na świecie [16]. Dzięki temu dodawanie go w pomijalnym stopniu zaburza objętość gazów w przestrzeni wentylowanej. Zestaw symulatorów posiada ekstremalnie krótką drogę pomiędzy pompą symulującą wentylację płuc $\dot{V}_E$ a badanym systemem oddechowym, co nie powoduje sprężania i rozprężania czynnika oddechowego w linii wymuszającej akcję oddechową.

Równolegle prowadzone są badania w symulowanych warunkach hiperbarycznych z udziałem nurków eksperymentalnych. Na podstawie wyników tych badań określa się wiarogodność zastosowanego modelowania procesu wentylacji i wymiany gazowej w systemie ergonomicznym nurek–aparat nurkowy. Badania bez udziału nurków eksperymentalnych dają odpowiedź na temat wiarogodności zastosowanego modelu matematycznego w stosunku do procesów zachodzących w obiekcie rzeczywistym, jakim jest aparat nurkowy. Badania z udziałem nurków eksperymentalnych pozwalają ustalić, jakie występuje zmniejszenie wiarogodności modelu matematycznego przebiegu procesu wentylacji aparatu nurkowego, gdy dołożone zostanie zaburzenie związane ze zróżnicowaniem biometrycznym[131] nurków HF [132], oznaczane tutaj przez θ.

Pomimo tego, że tlen jest człowiekowi potrzebny do utrzymania hemostazy, to jest on także czynnikiem kancerogennym. Istnieją teorie postulujące, że jego oddziaływanie jest główną przyczyną starzenia się organizmów aerobowych[133]. W warunkach hiperbarycznych jest on bardziej niebezpieczny ujawniając niektóre formy toksyczności niespotykane w życiu codziennym. W warunkach hiperbarycznych tlen wykazuje toksyczność płucną[134], ośrodkową[135] oraz toksyczność somatyczną[136] [17-20]. Przy krótkotrwałych nurkowaniach wojskowych najgroźniejszą formą toksyczności tlenowej jest toksyczność ośrodkowa CNSyn.

Podczas eksperymentów z ośrodkowym zatruciem tlenowym CNSyn obserwowano często mniej specyficzne symptomy, takie jak: niepokój, bladość twarzy, drżenie warg i powiek, mdłości, skurcze, oszołomienie, brak koordynacji, halucynacje wzrokowe i słuchowe, zawężenie pola widzenia czy zaburzenia mowy. Symptomy te rzadko poprzedzają postać drgawkową. Początek uogólnionych drgawek jest nagły. Atak zaczyna się od fazy tonicznej, trwającej zazwyczaj 30 s, podczas której nurek traci przytomność i ustaje czynność oddechowa. Następnie występuje faza kloniczna z nieskoordynowanymi ruchami całego ciała. Cały atak trwa najczęściej ok. 2 min.

Jeżeli zatrucie wystąpiło w wodzie nurek zabezpieczający powinien spróbować odczekać czas do powrotu przynajmniej części świadomości i oddechu, można dopuścić do okresu bezdechu trwającego do 3 min. Wynurzanie nurka bez przywrócenia akcji oddechowej może spowodować uraz ciśnieniowy płuc, gdyż najczęściej zatruciu tlenowemu i ustaniu akcji

oddechowej towarzyszy zaciśnięcie krtani. Ciężkie postaci ośrodkowego zatrucia tlenowego CNSyn prowadzą do śmierci. Na świecie istnieje wiele modeli empirycznych do przewidywania zagrożenia ośrodkową formą toksyczności tlenowej CNSyn [21].

W projekcie, wykorzystano najszersze opublikowane systematyczne prowadzone badania nad modelowaniem zagrożenia tlenową toksycznością ośrodkową CNSyn[137] opierające się na matematycznej analizie przetrwania[138] [22-23]. Podstawę do adiustacji modelu stanowiły wyniki badań przeprowadzonych w czasie II Wojny Światowej przez Brytyjczyków [24-25], oraz ich kontynuację przez Amerykanów do późnych lat 70. ubiegłego wieku [26]. Badania własne nad adekwatnością takiego podejścia do modelowania ośrodkowej toksyczności tlenowej CNSyn zakończyły się walidacją ustanowionego modelu przez US Navy [4].

Do szacowania stopnia relaksacji[139] po ekspozycjach tlenowych wykorzystuje się najczęściej model empiryczny[140] zaproponowany przez National Oceanic and Atmospheric Administration [27].

Szacowanie rozkładów bezpiecznej dekompresji oparto w projekcie na zaniechanym[141] modelu $ZH - L_{12}$ opracowanym przez Bühlmanna dla armii szwajcarskiej [28]. Model ten uwzględnia uwarunkowania wojskowe, jak: specjalny dobór grupy nurków, utrzymywanie nurków w kondycji do przechodzenia forsownych dekompresji, podwyższony poziom aprobowanego zagrożenia itp. Model ten można przyjąć jako granicznie bezpieczny. Został on walidowany podczas wcześniej prowadzonych badań [29-30].

Projektowanie dekompresji musi opierać się o przewidywane scenariusze operacji nurkowych, zastosowane środki bezpieczeństwa[142], warunki odpoczynku przed i po nurkowaniu, warunki transportu itp. Ocena tych parametrów może być prowadzona na drodze nurkowań eksperymentalnych w warunkach symulacji, co pozwala na ustalenie dozwolonych zakresów wybranych parametrów ekspozycji.

Walidacja podejścia, podobnie jak w poprzednich etapach badań, może być realizowana na drodze statystycznej przy wykorzystaniu analizy sekwencyjnej [31-32].

Przedstawione na rys.1 modele deterministyczne wentylacji półzamkniętej przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego SCR CRABE SCUBA i dekompresji, oraz model statystyczny zagrożenia toksycznością tlenową CNSyn zostały ustalone z taką wiarogodnością, że model empiryczny $\varepsilon = f(H)_\theta$ zmiany modułu oddechowego ε wraz z głębokością H dla wybranej populacji nurków eksperymentalnych θ jako parametru, stał się elementem modelowania o największym wpływie na bezpieczeństwo prowadzenia ekspozycji hiperbarycznej.

Wybrana populacja nurków θ była standardową populacją dopuszczoną do nurkowań wojskowych w Marynarce Wojennej RP. Dodatkowo populacja θ powinna przejść test na odchylenia od funkcji $\varepsilon = f(H)_\theta$ opisującej zmiany[143] modułu oddechowego ε wraz z głębokością H oraz test tolerancji tlenowej TTT [32]. Negatywny wynik testu tolerancji tlenowej TTT stanowi przesłankę dla nurka do planowania operacji nurkowych jedynie o zmniejszanym zagrożeniu ośrodkową toksycznością tlenową CNSyn oraz zachowania ostrożności przy planowaniu procesu leczenia przy wykorzystaniu procedur tlenowych $oxy - TT$[144] [32]. Zaś odchylenia od ustalonej funkcji $\varepsilon = f(H)_\theta$, powodują, że ze względów bezpieczeństwa, nurek powinien mieć inaczej zaprojektowaną dekompresję. Negatywne wyniki tych testów raczej dyskwalifikują nurka ze szkolenia nurkowego z wykorzystaniem aparatu SCR CRABE SCUBA, z formalnych względów organizacyjnych[145].

Możliwość ciągłego poprawiania precyzji projektowania dekompresji wiąże się z ciągłym doskonaleniem modelu empirycznego $\varepsilon = f(H)_\theta$ zmiany modułu oddechowego ε wraz z głębokością H. Każde nurkowanie dostarczające wiarogodnych[146] danych z jego przebiegu powiększa bazę danych do wnioskowania o precyzji ustalenia funkcji $\varepsilon = f(H)$ i może posłużyć jako wytyczna do zmiany rozkładu dekompresji. Nurkowania operacyjne nie mogą dostarczać wiarogodnych danych do takiego wnioskowania, lecz treningi i szkolenia prowadzone na symulatorze dają taką możliwość.

Wnioskowanie o zwiększeniu zagrożenia jest związane z diagnozowaniem odchyleń od modelu empirycznego $\varepsilon = f(H)_\theta$ zmian modułu oddechowego ε wraz z głębokością H. Dane zbierane podczas treningów i szkoleń na symulatorze nurkowania przyczyniają się do tyupowania nurków, dla których procedura dekompresyjna może być potencjalnie niebezpieczna. Badania nurków na symulatorze nurkowania mogą służyć do wyeliminowania zagrożenia DCS.

Jeśli wyniki badań nie wykazują odchyleń od modelu $\varepsilon = f(H)_\theta$ a obserwuje się zwiększone zagrożenie objawami choroby dekompresyjnej DCS, to należy poszukiwać innych przyczyn, przykładowo odstępstw od technologii[147] prowadzenia prac podwodnych czy poszukiwać przyczyn kazuistycznych[148]. Monitorowanie odstępstw od modelu empirycznego $\varepsilon = f(H)_\theta$ zmiany modułu oddechowego ε wraz z głębokością H daje potencjalne narzędzie pracy oficerowi odpowiadającemu za bezpieczeństwo nurkowania w Marynarce Wojennej RP.

KONTEKST PROJEKTOWY

Projekt naukowy jest procesem przebiegającym w systemie zawierającym strukturę pozwalającą na jego realizację[149], dla którego należy prowadzić analizę kontekstu wewnętrznego i zewnętrznego.

Celem projektu była potrzeba operacyjna wdrożenia krajowej[150] technologii nurkowań przy wykorzystaniu niezależnego aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego SCR CRABE SCUBA jako podprocesu operacji przeciwminowych MCM. Analizę kontekstu projektu przeprowadzono metodą SWOT[151]. Osobnym problemem będzie analiza kontekstu wojny minowej dla nurkowań przy wykorzystaniu technologii nurkowania w aparacie SCR CRABE SCUBA.

Wyniki generacji spodziewanych mocnych i słabych stron oraz zagrożeń i szans zebrano w tab. 2. Mocne strony S, zawierają wszystko to, co stanowi atuty, przewagę czy zaletę analizowanego systemu, którym jest ustanowiony projekt badawczy. Słabe strony W zawierają wszystko to, co stanowi słabość, barierę czy wadę analizowanego systemu. Szanse O zawierają wszystko to, co stwarza dla analizowanego systemu szansę korzystnej zmiany. Jako zagrożenia T przedstawiono wszystko to, co stwarza dla analizowanego systemu niebezpieczeństwo zmiany niekorzystnej.

Mocną stronę wynikającą z kontekstu projektu stanowi posiadana baza naukowo-badawcza. Jej początki sięgają czasów Rady Wzajemnej Pomocy Gospodarczej, która podjęła decyzję o specjalizowaniu się Polski w produkcji systemów hiperbarycznych zapewniających możliwość prowadzenia długotrwałych prac podwodnych do głębokości 200 mH_2O. Podstawowe obiekty ciśnieniowe miała produkować Stocznia Szczecińska. Koordynacja programu badawczego na potrzeby

Stoczni została powierzona Politechnice Gdańskiej. Akademia Marynarki Wojennej AMW miała zaś być dostawcą systemów zachowania życia. Dla zapewnienia finansowania tak rozległych prac ustanowiono Centralne Projekty Badawczo-Rozwojowe CPBR. Szybko zdano sobie sprawę, że ważnym elementem zapewniającym sukces przedsięwzięcia będą próby zdawczo-odbiorcze wiążące się z koniecznością przeprowadzeniem nurkowań saturowanych. W tamtych czasach technologie nurkowań saturowanych były zaliczane do zdolności strategicznych i nie były udostępniane. Postanowiono powierzyć zadanie opracowania takiej technologii Wojskowej Akademii Medycznej[152] WAM, która nie dysponowała własnym zapleczem technicznym ale współpracowała z AMW.

Zdano sobie także sprawę, że możliwość wynajęcia profesjonalnego zespołu nurków spoza Polski związana jest z tak dużą barierą ekonomiczną, że zdecydowano się rozszerzyć działania o ustanowienie oddzielnego CPBR[153] w ramach którego należało wyszkolić takie ekipy. Zadanie to powierzono zespołowi WAM – AMW. Badania przeprowadzone w tamtym czasie i późniejsze wdrożenia technologii przyczyniły się do powstania bazy wiedzy do dalszych prac w zakresie szeroko rozumianych technologii nurkowych, które były kontynuowane także przy współpracy międzynarodowej.

Tab. 2

Najważniejsze mocne strony S, słabe strony W, szanse O oraz zagrożenia T dla uwarunkowań wewnętrznych i zewnętrznych dotyczących wdrożenia krajowej technologii nurkowania z wykorzystaniem niezależnego aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego SCR CRABE SCUBA.

S	1	posiadana baza naukowo-badawcza
	2	posiadany potencjał naukowo-badawczy
	3	zdobyte doświadczenia
W	1	niewystarczająca wojskowa baza obsługowa
	2	niewydolny system zaopatrzenia
	3	możliwości tabel dekompresyjnych i leczniczych
O	1	zwiększenie wymaganych zdolności operacyjnych w ramach NATO
	2	opracowania systemowego podejścia do projektowania operacji nurkowych
	3	plan modernizacji Sił Zbrojnych
T	1	spodziewany długi okres realizacji
	2	potrzeba znacznych nakładów finansowych
	3	trudności w utrzymaniu trwałości efektów projektu
S (Strengths) – mocne strony: wszystko to, co stanowi atut, przewagę, zaletę analizowanego systemu		
W (Weaknesses) – słabe strony: wszystko to, co stanowi słabość, barierę, wadę analizowanego systemu		
O (Opportunities) – szanse: wszystko to, co stwarza dla analizowanego systemu szansę korzystnej zmiany		
T (Threats) – zagrożenia: wszystko to, co stwarza dla analizowanego obiektu niebezpieczeństwo zmiany niekorzystnej		

Zdobyta wiedza posłużyła do ciągłej obecności serwisu AMW świadczącego usługi prac podwodnych dla polskich platform wiertniczych oraz wdrożenia różnych technologii nurkowych. Powstała w tamtym czasie baza techniczna była wielokrotnie modernizowana i w obecnym czasie reprezentuje wysoki poziom światowy. Ponad trzydziestoletnie doświadczenie pozwala domniemywać, że projekt ma szanse na poszerzenie granic poznania w zakresie technologii hiperbarycznych.

Słabymi stronami projektu jest niewystarczająca baza remontowa dla pozyskanych z planu modernizacji Sił Zbrojnych aparatów nurkowych oraz niewydolny system zaopatrzenia w części zamienne.

Najważniejszą słabą stroną wynikającą z kontekstu zewnętrznego jest fakt dostarczenia przez dostawcę tabel dekompresyjnych, które nie pokrywają wszystkich wymagań. Przepisy i ugruntowana tradycja w Marynarce Wojennej RP wymusza na wykorzystywanej technologii nurkowania, między innymi:

- przy awarii zasilania tlenem możliwość dokończenia dekompresji przy wykorzystaniu mieszaniny używanej podczas pobytu na dnie,
- w przypadku zwiększenia zafalowania akwenu zakończenia dekompresji na przystanku 6 mH_2O.

Dostarczona technologia nurkowania nie posiadała także dodatkowych zaleceń co do leczenia ciężkich przypadków choroby dekompresyjnej powstałej w skutek wyrzucenia nurka czy ominięcia znacznej części przystanków dekompresyjnych[154].

Wdrożenie niezależnych nurkowań z wykorzystaniem SCR CRABE SCUBA daje szansę spełnienia przez Polskę wymagań NATO oraz zwiększa możliwości interoperacyjności Marynarki Wojennej RP.

Najważniejszą poznawczą szansą wynikająca z prowadzenia projektu jest możliwość zapełnienia luki w wiedzy umożliwiającej pokrycie wymagań taktycznych czy rozwoju technologii nurkowych. Pozyskana wiedza umożliwi efektywne działania w przyszłości, niestety należy liczyć się, że na etapie początkowym prac należy podjąć kosztowne i długotrwałe badania. Dużą szansą na pomyślne zakończenie projektu może stanowić wsparcie wynikające z planu modernizacji Sił Zbrojnych.

Głównym zagrożeniem jest czas oczekiwania na pierwsze rezultaty projektu, który decydentom zawsze wydaje się za długi a potrzebne na prakrycie badań naukowych środki finansowe za wysokie. Jednak największym problemem jest długofalowe utrzymanie efektów projektu. Ten problem dotyczy nie tylko Polski, lecz prawie wszystkich partnerów Sojuszu, gdyż powstała luka pokoleniowa wśród specjalistów zajmujących się techniką hiperbaryczną. Obserwuje się wręcz pewnego rodzaju uwstecznienie, uwidoczniające się powtórnym rozwiązywaniem tych samych problemów, czasami z gorszym rezultatami w porównaniu do pierwotnie otrzymanych efektów.

W fazie analizy mocy asocjacji, dla wygenerowanych mocnych S i słabych stron W, szans O, oraz zagrożeń T dla uwarunkowań wewnętrznych i zewnętrznych dotyczących realizacji zakresu projektu, przeprowadzono analizę mocy powiązań w trzystopniowej skali:

- 0 brak powiązania,
- 1 słabe powiązania,
- 2 silne powiązania.

Wyniki analizy tych powiązań zawarto w tab. 3.

Tab. 3

Wyniki analizy siły powiązań pomiędzy mocnymi stronami S i słabymi stronami W a szansami O oraz zagrożeniami T dla uwarunkowań wewnętrznych i zewnętrznych dotyczących wdrożenia krajowej technologii nurkowania z wykorzystaniem niezależnego aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego SCR CRABE SCUBA.

		O. Szanse			T. Zagrożenia		
		1	2	3	1	2	3
S. Mocne strony	1			2	1	1	2
	2			2	2	2	2
	3	2		2	2	2	1
W. Słabe Strony	1	2		2	2	2	
	2	2	1		2	1	
	3	2	2	2	2	2	

0- brak oddziaływania

1- słabe oddziaływania

2- silne oddziaływania

Tab. 4

Wyniki analizy implikacji dla silnych powiązań pomiędzy mocnymi stronami S i słabymi stronami W a szansami O oraz zagrożenimi T dla uwarunkowań wewnętrznych i zewnętrznych dotyczących wdrożenia krajowej technologii nurkowania z wykorzystaniem niezależnego aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego SCR CRABE SCUBA.

		O.Szanse			T.Zagrożenia			O.Szanse			T.Zagrożenia		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
S.Mocne strony	1			T			T			T			T
	2			T	T	T				T		T	T
	3	T		T	T	T				T			
W.Słabe strony	1	T			T					T	T	T	
	2	T			T						T		
	3	T							T		T	T	

Czy dana mocna strona pozwoli wykorzystać daną szansę? Czy dana szansa wzmacnia daną silną stronę?

Czy dana mocna strona pozwoli zniwelować dane zagrożenie? Czy dana szansa pozwala zniwelować daną słabość?

Czy dana słaba strona ogranicza możliwość wykorzystania danej szansy? Czy dane zagrożenie niweluje daną silną stronę?

Czy dana słaba strona potęguje ryzyko związane z danym zagrożeniem? Czy dane zagrożenie uwypukla daną słabość?

T—Tak

Numeracja wygenerowanych mocnych stron S, słabych stron W, szans O oraz zagrożeń T dla uwarunkowań wewnętrznych i zewnętrznych, dotyczących realizacji projektu jest identyczna jak w tab. 2 i tab. 3.

Analizę implikacji wyłonionych silnych asocjacji dla lewej strony tab.4 przeprowadzono odpowiadając na pytania:

- Czy dana mocna strona pozwoli wykorzystać daną szansę?
- Czy dana mocna strona pozwoli zniwelować dane zagrożenie?
- Czy dana słaba strona ogranicza możliwość wykorzystania danej szansy?
- Czy dana słaba strona potęguje ryzyko związane z danym zagrożeniem?

a dla prawej strony tab. 4 przeprowadzono odpowiadając na pytania:

- Czy dana szansa wzmacnia daną silną stronę?
- Czy dana szansa pozwala zniwelować daną słabość?
- Czy dane zagrożenie niweluje daną silną stronę?
- Czy dane zagrożenie uwypukla daną słabość?

Zebrane w tab. 4 wyniki analizy implikacji dla silnych powiązań posiadają taką samą numerację mocnych stron S, słabych stron W, szans O oraz zagrożeń T, jak w tab. 2 i tab. 3.

Odpisano jedynie silne powiązania, dla których ujawniono związki deterministyczne[155] w postaci pozytywnej odpowiedzi na pytania uwidocznione w tab. 4.

Czy posiadana baza naukowo-badawcza pozwoli na zwiększenie wymaganych zdolności operacyjnych w ramach NATO?

Po modernizacji, posiadana baza naukowo-badawcza umożliwi wykonanie badań na stanowiskach pomiarowych z udziałem nurków eksperymentalnych w zakresie potrzebnych technologii pokrywających wymagane scenariusze operacyjne. Podstawowym zakresem modernizacji kompleksu hiperbarycznego będzie przywrócenie możliwości chłodzenia wody w basenie. Modernizacji wymaga też system monitoringu wizyjnego, parametrów nurkowania i zapisu prowadzonych rozmów. Stanowisko do badań aparatów nurkowych wymaga zbudowania od podstaw nowego symulatora metabolicznego i włączenie go do systemu symulatorów oddechowego i hiperbarycznego.

Posiadana baza hiperbaryczna spełnia też rolę trenażera dla nurków MCM oraz jest wykorzystywana podczas szkoleń nurków MCM na wyższe stopnie nurkowe.

Czy posiadany potencjał naukowo-badawczy pozwoli na zwiększenie wymaganych zdolności operacyjnych w ramach NATO?

Wydaje się, że Akademia Marynarki Wojennej nadal dysponuje wystarczającym potencjałem ludzkim do przeprowadzenia koniecznych badań. Jednak zabezpieczenie medyczne jest realizowane przez lekarza zatrudnionego na umowę cywilno−prawną. Także nurkowie eksperymentalni są kontraktowani na umowy cywilno−prawne z jednostek wojskowych. Stąd większość działań projektowych musi być realizowana poza godzinami służbowymi.

Czy zdobyte doświadczenie pozwoli na zwiększenie wymaganych zdolności operacyjnych w ramach NATO?

Obecnie wydaje się, że zdobyte doświadczenie w pracach nad nowymi technologiami nurkowymi pozwoli na zrealizowanie także obecnego projektu. Oczekiwane jest pozyskanie nowej wiedzy, która pozwoli dokonać znacznego wzrostu efektywności pracy. Taką nadzieję stwarzałoby opracowanie nowych modeli matematycznych podstawowych procesów dla ergonomicznego systemu nurek−aparat nurkowy. Zwłaszcza adekwatny model wentylacji przestrzeni oddechowej przyczyniłby się do znacznego postępu w projektowaniu technologii nurkowania oraz otoczenia systemowego.

Należy poszukiwać w miarę możliwości modeli deterministycznych a modele probabilistyczne powinny być wykorzystywane jedynie w procesie walidacji opracowanych technologii

Czy posiadana baza naukowo−badawcza pozwoli zniwelować zagrożenie związane z trudnościami w utrzymaniu trwałości efektów projektu?

Baza naukowo−badawcza jest doskonałym narzędziem do prowadzenia badań nad nowymi technologiami nurkowymi. Jednak przy braku specjalistów, którzy chcieliby samodzielnie podejmować badania w tym zakresie nie uda się utrzymać trwałości efektów projektu. Podobnie jak w innych ośrodkach światowych wraz z odejściem dotychczas pracujących tam naukowców posiadane kompetencje tych instytucji powoli zanikają.

Czy posiadany potencjał naukowo−badawczy pozwoli zniwelować zagrożenie związane ze spodziewanym długim okresem realizacji projektu?

Zniecierpliwienie zleceniodawców jest przyczyną niepowodzeń wielu projektów. Zwłaszcza wypadki śmiertelne zmniejszają cierpliwość okazywaną zespołom badawczym. Wydaje się, że Marynarka Wojenna RP zdoła zachować wystarczającą cierpliwość ze względu na niezadawalający postęp w badaniach nad technologiami nurkowania dla aparatów SCR CRABE SCUBA i SCR IS − Mix SCUBA.

Wydaje się obecnie, że zespół realizujący projekt posiada doświadczenie w zakresie opracowywania nowych technologii nurkowych. A używane procedury i wyposażenie są na dobrym poziomie światowym. Nie gwarantuje to zniwelowania zagrożenia związanego ze spodziewanym długim okresem realizacji projektu, lecz daje nadzieję, że projekt skończy się sukcesem w zakładanej perspektywie czasowej.

Czy posiadany potencjał naukowo−badawczy pozwoli zniwelować zagrożenie związane ze spodziewanymi dużymi nakładami na realizację projektu?

Niezadawalający postęp w badaniach nad technologią dla aparatów SCR CRABE SCUBA i SCR IS − Mix SCUBA niewątpliwie wiąże się z niskimi nakładami finansowymi oraz zawężaniu perspektyw czasowych dla zespołów realizujących projekty.

Budżet projektu jest typowym dla projektów o średnim poziomie finansowania. Zawiera elementy modernizacji infrastruktury, która jest także wykorzystywana w szkoleniach i treningach. Stąd poziom finansowania nie budził zastrzeżeń. W warunkach stabilności ekonomicznej kraju budżetowanie projektu
wydaje się zapewnione.

Czy zdobyte doświadczenie pozwoli zniwelować zagrożenie związane ze spodziewanym długim okresem realizacji projektu?

Zgromadzona baza wiedzy budzi duże nadzieje na przełamanie luki w wiedzy przy modelowaniu wentylacji aparatów nurkowych o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego SCR. Kluczowym w tym zakresie będzie powtórne zbudowanie symulatora metabolicznego na nowym stanowisku symulacyjnym składającym się z symulatora oddechowego i hiperbarycznego. Zdobyte doświadczenie z poprzednio wykorzystywanym symulatorem pozwala sądzić, że w ramach projektu spodziewany jest znaczny postęp w wiedzy w zakresie projektowania ergonomicznych systemów aparat nurkowy−nurek.

Czy zdobyte doświadczenie pozwoli zniwelować zagrożenie związane ze spodziewanymi dużymi nakładami na realizację projektu?

Można mieć uzasadnione nadzieje, że podczas realizacji projektu nastąpi przełom i zostanie wypełniona następna luka w wiedzy pozwalająca na efektywniejszą pracę nad nowymi technologiami nurkowymi. Jednak taki scenariusz najczęściej nie przyczynia się do obniżenia kosztów, lecz powoduje przewartościowanie celów w kierunku wyższego standardu jakościowego dla rozwiązania końcowego.

Jeśli osiągnięcia naukowe projektu będą znaczne, to należy raczej spodziewać się, że możliwy do osiągnięcia wyższy standard jakościowy będzie wymagał dodatkowego wsparcia finansowego oraz rozszerzenia czasu realizacji projektu.

Czy niewystarczająca wojskowa baza obsługowa ogranicza możliwości zwiększenia wymaganych zdolności operacyjnych w ramach NATO?

Formalnie niewystarczająca baza obsługowa dla aparatów nurkowych SCR CRABE SCUBA nie ogranicza możliwości zwiększenia wymaganych zdolności operacyjnych w ramach NATO, lecz obniża gotowość bojową przez zbyt rozwlekłe procedury biurokratyczne, które przy dobrej woli można skrócić. Jednak obsługa sprzętu nurkowego opiera się w znacznej mierze o usługi zewnętrzne, które muszą być kontraktowane w ramach zamówień publicznych. W warunkach konieczności utrzymania stałej, podwyższonej gotowości bojowej[156] ten model nie jest dostatecznie wydolny.

Czy niewydolny system zaopatrzenia ogranicza możliwości zwiększenia wymaganych zdolności operacyjnych w ramach NATO?

Według filozofii prowadzenia działań bojowych niewydolny system zaopatrzenia dla aparatów nurkowych SCR CRABE SCUBA eliminuje możliwości utrzymania zdolności operacyjnych do prowadzenia podwodnych działań bojowych, w tym w ramach NATO.

Jednostki wydzielające patrole minerskie powinny dysponować oddzielnym funduszem na utrzymanie stałej gotowości bojowej. Niezależnie od potrzeb, które będą planowane na podstawie zebranych doświadczeń i realizowane centralnie, jednostki te powinny posiadać do swej dyspozycji warsztaty naprawcze, systemy do otrzymywania i dopuszczenia do użytku czynników oddechowych, możliwość szybkiego zakupu gazów, części zamiennych itp.

Czy obecne możliwości tabel dekompresyjnych i leczniczych ograniczają możliwości zwiększenia wymaganych zdolności operacyjnych w ramach NATO?

Projekt koncentruje się na planowaniu dekompresji dostosowanej do scenariuszy operacyjnych realizowanych przez nurków MCM, dla których możliwości dotychczas wykorzystywanych tabel były w tym zakresie ograniczone.

Przy niezależnych nurkowaniach głębokowodnych należy liczyć się z przypadkiem wyrzucenia nurka. Doświadczenia innych krajów NATO pokazują, że standardowe procedury oparte o zestaw tabel proponowany przez US Navy może być niewystarczający. Zabezpieczenie takich nurkowań wymagać może stosowania tradycyjnego leczenia w warunkach saturacji. Wymaga to zmian w projektach nowych komór dekompresyjnych planowanych w projekcie KORMORAN II, modernizowanych obiektów hiperbarycznych na ORP PIAST i ORP LECH oraz zestawów SERCÓWKA.

Niestety inne kraje NATO nie są przygotowane do udzielenia nam wystarczającego wsparcia działań leczniczych, dlatego ta problematyka musi być rozwiązana siłami krajowymi.

Czy niewystarczająca wojskowa baza obsługowa potęguje ryzyko związane ze spodziewanym długim okresem realizacji projektu?

Niewystarczająca wojskowa baza obsługowa może spowodować brak sprawnych aparatów do badań a przez to wydłużyć czas realizacji projektu.

Czy niewydolny system zaopatrzenia potęguje ryzyko związane ze spodziewanym długim okresem realizacji projektu?

Niewydolny system zaopatrzenia powoduje, że może wystąpić brak części zamiennych do aparatów nurkowych i wpłynąć na brak sprawnych aparatów do badań a przez to wydłużyć czas realizacji projektu.

Analiza prawej strony tab. 4 jest komplementarna do przeprowadzonej powyżej i raczej nie ujawni dodatkowych uwarunkowań wynikających z kontekstu projektu, stąd nie będzie tutaj przedstawiona.

RYZYKO W PROJEKCIE

Wstępną analizę ryzyka realizacji projektu wykonano metodą Failure Mode and Effects Analysis FMEA [33]. Innego sposobu podejścia będzie wymagać analiza ryzyka taktycznego użycia technologii nurkowań MCM jako elementu systemu wojny minowej[157].

Analiza ryzyka prowadzona metodą FMEA nakierowana jest na zdolność do przewidywania wystąpienia niezgodności w systemie lub przebiegającym w nim procesie w oparciu o wiedzę ekspercką i zawczasu opracowanie sposobów reakcji na przewidywane formy materializacji ryzyka w postaci zagrożenia lub szansy, bez względu na skalę finansową efektu tej materializacji. Metodą FMEA można hierarchizować potencjalne ryzyko pod względem prawdopodobieństwa i skali technicznego oddziaływania w chwili jego materializacji. Skalę finansową[158] materializacji ryzyka należy oceniać równolegle do analizy technicznej, aby nie ukierunkowywać działania w celu zminimalizowania mało dotkliwych finansowo skutków materializacji ryzyka zaś bardziej dotkliwe pozostawiać jako rezydualne. Metoda ta została z powodzeniem zastosowana także podczas prowadzenia innych projektów [34-35].

Metodyka FMEA nie tylko przyczynia się do minimalizowania skutków materializacji ryzyka, ale ustala hierarchię rodzajów zdiagnozowanych, inherentnych jego rodzajów a przez to pozwala ustalić niezbędny poziom i kierunki prowadzonego monitoringu zagrożeń i szans.

W analizie używane są pojęcia ryzyka i zagrożenia. Całka funkcji ryzyka od momentu $t = 0$ do momentu czasu t określa tutaj zagrożenie lub szansę materializacji ryzyka.

W fazie początkowej zdiagnozowano osiem rezydualnych, możliwych zagrożeń istniejących w projekcie, związanych z sześcioma rodzajami ryzyka:

1. brakiem odpowiedniej liczby nurków eksperymentalnych,
2. brakiem kontroli nad higieną życia u nurków,
3. doborem nieadekwatnej populacji nurków,
4. wystąpieniem kazuistycznego[159] przypadku choroby ciśnieniowej DCS,
5. sprawdzaniem technologii w warunkach odbiegających od rzeczywistych,
6. nieadekwatnym działaniem aparatu nurkowego.

Tab. 5

Zdiagnozowane podstawowe rodzaje ryzyka w projekcie.

Rodzaj problemu/ sytuacji problemowej	Efekt matrializacji ryzyka	Intensywność oddziaływania po materializacji ryzyka *I*	Prawdopodobna przyczyna materializacji ryzyka	Prawdopodobieństwo zmaterializowania się ryzyka *P*	Możliwość detekcji materializacji ryzyka	Prawdopodobieństwo detekcji materializacji ryzyka *D*	*RPN* *RPN=I×P×D*	Zastosowane przeciwdziałanie materializacji ryzyka	Poprawione *RPN* *I*	*P*	*D*	*RPN*
Brak odpowiedniej liczby nurków eksperymentalnych	Brak możliwości walidacji technologii	9	Problemy administracyjne	8	pełna detekcja	5	**360**	minimalizowanie	9	3	4	**108**
Brak kontroli nad higieną życia u nurków	Potencjalny wypadek	7	Chęć zatajenia	7	Możliwa średnia detekcja	8	**392**	unikanie, redukowanie	7	4	4	**112**
Dobór nieadekwatnej populacji nurków	Nieadekwatna technologia	7	Brak screeningu	5	Możliwa średnia detekcja	6	**210**	minimalizowanie	7	3	2	42
Wystąpienie kazuistycznego przypadku choroby ciśnieniowej	Zatrzymanie badań	9	Możliwe zdarzenie losowe	4	Możliwa średnia detekcja	6	**216**	przeniesienie, współdzielenie	4	4	6	96
Sprawdzenie technologii w warunkach odbiegających od rzeczywistych	Nieadekwatna technologia	7	Ograniczona kontrola temperatury wody	8	idealna detekcja	1	56	zamiana	7	2	1	14
		7	Niedokładne analizy zewnętrzne	7	pełna detekcja	9	**441**	redukowanie	7	7	2	98
Nieadekwatne działanie aparatu nurkowego	Potencjalny wypadek	7	Brak sprawdzenia aparatu	4	pełna detekcja	6	**168**	omijanie	7	3	2	42
		7	Awaria	6	idealna detekcja	1	42	akceptowanie	7	6	1	42

	Intensywność stwarzanego zagrożenia *I*	Prawdopodobieństwo wystąpienia *P*	Prawdopodobieństwo detekcji *D*
	1:Prawie nieodczuwalne	1: Nieprawdopodobne	1: idealna detekcja $D_{\%}$@100%
	2-3: Niewielkie obciążenie klienta	2-3: Bardzo mało prawdopodobne	2-5: pełna detekcja (100%>$D_{\%}$[3]99,7%)
	4-6: Umiarkowane oddziaływanie	4-6: Małe prawdopodobieństwo	6-8: możliwa średnia detekcja (99,7%>$D_{\%}$[3]98%)
	7-8: Duże oddziaływanie	7-8: Umiarkowane prawdopodobieństwo	9: niepełna detekcja (98%>$D_{\%}$[3]90%)
	9-10: Bardzo duże oddziaływanie	9-10: Wysokie prawdopodobieństwo	10: brak detekcji $D_{\%}$@0%

***RPN* (Risk Priority Number) - Wartość krytyczna względnej liczby ryzyka *RPN*>100**

Ad. 1 Intensywność stwarzanego zagrożenia przez brak odpowiedniej liczby nurków eksperymentalnych jest duża i została określona na względnym poziomie I = 8 w dziesięciostopniowej skali porządkowej, gdyż efektem materializacji tego zagrożenia będzie brak możliwości walidacji proponowanej technologii bądź walidacja obarczona będzie błędem systematycznym. Spowodowane z reguły barierami administracyjnymi, prawdopodobieństwo powstania zagrożenia oszacowano na umiarkowanym poziomie i we względnej, dziesięciostopniowej skali porządkowej określono je na P = 8 przy możliwej pełnej detekcji. Stąd prawdopodobieństwo detekcji oszacowano na poziomie 100% > D% ≥ 99,7%, co odpowiada wartości względnej D = 5 w dziesięciostopniowej skali porządkowej. Wartość względnej liczby ryzyka kształtuje się w tym przypadku na poziomie RPN = 320 przekraczając ponad 3 krotnie wartość krytyczną $RPN_{kr} = 100$ − tab. 5.

Jako sposób reakcji na występujące ryzyko braku odpowiedniej liczby nurków eksperymentalnych, stwarzające zagrożenie brakiem walidacji opracowywanej technologii lub walidacją obciążoną błędem systematycznym, obrano jego minimalizowanie poprzez stworzenie zachęt finansowych i decydując się dodatkowo na prowadzenie eksperymentów poza godzinami służbowymi nurków wojskowych[160].

Powoduje to obniżenie względnego prawdopodobieństwa materializacji ryzyka wystąpienia hamulców biurokratycznych, do poziomu bardzo mało prawdopodobnego, oszacowanego na względnym poziomie P = 3 oraz nieznaczne zwiększenie prawdopodobieństwa detekcji, ze względu na spodziewaną współpracę z nurkami skutkującą odpowiednio wczesnym zawiadamianiem o niemożliwości przystąpienia do badań w danym terminie: D = 4. Pozwala to na obniżenie wartości liczby ryzyka do poziomu RPN = 108, leżącego w pobliżu wartości krytycznej.

Dotąd nie zaobserwowano znacznych problemów z brakiem nurków eksperymentalnych, lecz zasoby czasu wolnego nurków wojskowych pozostają ograniczone, stąd zagrożenie nadal istnieje. Podjęto próby w ramach Komitetu Sterującego zachęcające Gestora do wystąpienia do dowódców jednostek z wnioskiem o wydzielenie nurków do prowadzenia projektu. Umożliwiłoby to zmniejszenie prawdopodobieństwa powstania zagrożenia do poziomu mało prawdopodobnego P = 4, a możliwość detekcji do poziomu pełnej D = 3. Obniżyłoby to wartość względnej liczby ryzyka do poziomu RPN = 108, nieznacznie przekraczającego wartość krytyczną $RPN_{kr} = 100$, co jest wynikiem identycznym z poprzednim, dlatego wariant ten traktowany jest jako awaryjny.

Ad. 2 Brak kontroli nad higieną życia nurków jest dużym r y z y k i e m dla projektu, ocenianym na poziomie I = 7, gdyż stwarza ono potencjalne z a g r o ż e n i e wystąpieniem wypadku nurkowego przy materializacji tego r y z y k a. Ryzyko to jest powiązane z Ad.1, gdyż chęć dodatkowego zarobkowania połączona z niechęcią do zmiany zachowań w kierunku zwiększenia higieny życia potęguje to r y z y k o. Stąd prawdopodobieństwo materializacji r y z y k a oceniono jako umiarkowane, na poziomie P = 7, przy możliwym średnim prawdopodobieństwie detekcji na poziomie D = 8. Brak kontroli nad higieną życia nurków powoduje znaczne zagrożenie dla projektu na poziomie względnej liczby ryzyka RPN = 392. Reakcją na ryzyko będzie jego unikanie połączone z redukowaniem poprzez stosowanie sprzętu diagnostycznego: alkomat i zestaw do oznaczania zawartości kwasu mlekowego we krwi. Spowoduje to zredukowanie szacowanego prawdopodobieństwa materializacji ryzyka do poziomu małego P = 4 oraz zwiększenie prawdopodobieństwa detekcji do pełnego: D = 4. Wpłynie to na zmniejszenie szacowanej liczby ryzyka do poziomu RPN = 112, nieznacznie przewyższającego wartość krytyczną.

Ad. 3 Dobór nieadekwatnej populacji nurków może być spowodowany brakiem adekwatnych badań przesiewowych, lecz najczęściej wynika z potrzeby prowadzenia projektu przy ograniczonej liczbie nurków eksperymentalnych pozostających w dyspozycji. Stąd ryzyko to jest dość ściśle połączone z Ad.1. Intensywność stwarzanego zagrożenia oszacowano na poziomie dużego oddziaływania I = 7. Prawdopodobieństwo materializacji ryzyka oceniono na małe, na poziomie P = 5, przy średnim poziomie prawdopodobieństwa detekcji D = 6. Razem generuje to względną liczbę ryzyka na poziomie RPN = 210, ponad dwukrotnie przewyższającym wartość krytyczną. Reakcją na ryzyko będzie jego minimalizowanie poprzez przeprowadzenie dokładnych badań nurków podczas eksperymentów. Pozwoli to zminimalizować prawdopodobieństwo materializacji ryzyka do bardzo małego P = 3 i zwiększyć prawdopodobieństwo detekcji do poziomu pełnego D = 2. Obniża to względną liczbę ryzyka do pomijalnie małej RPN = 42. Podczas poprzednich projektów zdiagnozowano jednego nurka, który nie odpowiadał założeniom modelu działania aparatu. Wydaje się, że w przyszłości należy stosować badania przesiewowe nurków zaliczanych do tych, którzy będą mogli być szkoleni i nurkować z wykorzystaniem aparatu SCR CRABE SCUBA.

Możliwa do wykorzystania populacja wojskowych nurków eksperymentalnych jest nie do końca adekwatna, gdyż zgodnie z obowiązującym prawem dopuszcza się jako nurków eksperymentalnych żołnierzy posiadających uprawnienia starszego nurka. Droga do uzyskania takich uprawnień jest długa, stąd są to osobnicy starsi w populacji nurków, którzy będą użytkować opracowaną technologię. Jednym ze sposobów utrzymania adekwatności stosowanego podejścia jest ustanowienie mało realnego wymagania wykorzystania technologii jedynie przez żołnierzy z uprawnieniami na poziomie starszych nurków minerów.

Ad. 4 Kazuistyczny przypadek choroby ciśnieniowej DCS, czyli DCS o rzadkim przebiegu czy rzadko występujący, może zawsze zaburzyć przebieg procesu walidacji. Niektóre warunki sprzyjające wystąpieniu kazuistycznego przypadku DCS zostały wymienione przy omawianiu kontekstu fizjologicznego[161]. Częściowe przeciwdziałanie polega na badaniach zakwaszenia krwi czy obecności alkoholu w wydychanym powietrzu, kontrola higieny życia nurków, wytrenowania itp. Jednak złe nastawienie psychiczne, zażywanie suplementów diety, zaburzenia snu itp., mogą być przez nurka dysymulowane, zatajane czy bagatelizowane i nie zostać zdiagnozowane podczas wywiadu lekarskiego. Materializacja takiego ryzyka jest szczególnie dotkliwa, gdyż może prowadzić do zatrzymania badań na czas dochodzenia powypadkowego. Intensywność stwarzanego zagrożenia oszacowano na duże I = 7. Prawdopodobieństwo materializacji ryzyka jest mało prawdopodobne P = 4. Prawdopodobieństwo detekcji przed nurkowaniem można oszacować na poziomie średnim: D = 6. Strategią reakcji na ryzyko jest uświadamianie nurkom zagrożenia oraz jego przeniesienie i współdzielenie z ubezpieczycielem, stąd przewidziano znaczne środki na ubezpieczenie nurkowań eksperymentalnych w ramach odpowiedzialności cywilnej OC. Pozwoli to na zmniejszenie intensywności oddziaływania ryzyka do poziomu I = 4. Co zmniejszy względną liczbę ryzyka RPN z wartości RPN = 216 do poziomu RPN = 96, leżącego lekko poniżej wartości krytycznej.

Ponieważ wystąpienie kazuistycznego przypadku choroby ciśnieniowej DCS jest zawsze możliwe, zabezpieczenie przed wystąpieniem objawów DCS u nurków polega na monitoringu wolnej fazy gazowej w naczyniach żylnych. Metoda od lat wykorzystywana w Akademii, wydaje się jak dotąd bardzo użyteczna.

Ad. 5 Sprawdzenie technologii w warunkach odbiegających od rzeczywistych stwarza dużą intensywność materializacji ryzyka, ocenioną na I = 7. Prawdopodobne są dwa przypadki materializacji tego ryzyka.

Przy ograniczonej możliwości modyfikowania temperatury wody prawdopodobieństwo materializacji ryzyka oceniono na umiarkowane P = 8, przy idealnej detekcji I = 1. Względna liczba ryzyka dla tego przypadku leży poniżej wartości krytycznej RPN = 56. Reakcją na to ryzyko jest jego zamiana na szansę poprzez zbudowanie systemu oziębiania wody w basenie kompleksu hiperbarycznego. W tym przypadku szacowane prawdopodobieństwo materializacji ryzyka przy późniejszym wykorzystaniu technologii spada do wartości względnej P = 2 odpowiadającego zdarzeniu bardzo mało prawdopodobnemu. Tym samym względna liczba ryzyka spada do wartości pomijalnie małej RPN = 14.

Drugi rodzaj zagrożenia wiąże się z nadmiernym błędem oznaczenia zawartości tlenu i innych gazów w premiksie[162]. Wydawałoby się, że jest to zdarzenie bardzo mało prawdopodobne, ale zaobserwowano takie przypadki podczas poprzednich projektów, stąd oszacowano prawdopodobieństwo na poziomie umiarkowanym P = 7. Błędy tego typu powstają przy nawet małym odejściu od ustanowionych procedur SOP[163], dobrej praktyki nurkowej GLP[164] lub niedopasowania ergonomicznego: operator analityk−przyrząd pomiarowy. Często przy badaniach rutynowych takie ryzyko może się łatwo zmaterializować. Prawdopodobieństwo detekcji materializacji ryzyka jest niepełne D = 9. Powoduje to duże zagrożenie techniczne, gdyż względna liczba ryzyka jest równa ponad czterokrotności wartości krytycznej RPN = 441. Strategią reakcji na ryzyko jest jego redukcja poprzez: wydzielenie doświadczonego obserwatora, w obecności którego będą wykonywane analizy, zlecanie analiz dwóm laboratoriom lub sprawdzanie dodatkowo w laboratorium zewnętrznym. Pozwoli to na zwiększenie prawdopodobieństwa detekcji do pełnego D = 2 i obniżenie względnej liczby ryzyka do wartość lekko poniżej wartości krytycznej RPN = 98.

Zdiagnozowano odchylenia od założeń do wcześniejszych technologii nurkowania z wykorzystaniem aparatu nurkowego Nx/Tx − SCR CRABE SCUBA polegających na stosowaniu większego niż zakładano wysiłku podczas fazy wchodzenia do wody i wychodzenia z wody. Nurkowie nurkują z burty okrętu nie zaś z pontonu wykonując wysiłek ciężki podczas poruszania się po trapie. Jako środek zaradczy zaproponowano podniesienie poziomu gotowości technologii z poziomu VIII do IX przez zespół realizujący badania, podejmując kroki do uruchomienia kontynuacji projektu z uwzględnieniem tych uwarunkowań.

Materializacja takiego ryzyka jest krytyczna, gdyż powoduje zniweczenie znacznych zasobów finansowych i czasu, które zostały wydatkowane na przeprowadzenie projektu. Takie wypadki zdarzają się w praktyce, warto więc skorzystać z udostępnionego Lesson Learned przez marynarki wojenne NATO.

Dla niesprawdzonej do końca w działaniu konstrukcji aparatu SCR CRABE SCUBA, ryzyko nieadekwatnego działania może być spowodowane dwiema przyczynami: brakiem dokładnego sprawdzenia przed nurkowaniem lub awarią. W obu przypadkach materializacja ryzyka może prowadzić do wypadku nurkowego, stąd intensywność oddziaływania zagrożenia została oceniona na poziomie dużym I = 7. Prawdopodobieństwo nieprawidłowego sprawdzenia aparatu nurkowego przed nurkowaniem oszacowano na poziomie P = 5 a prawdopodobieństwo detekcji na poziomie D = 7 ze względu na zaistniały podczas badań przypadek złego przygotowania aparatu spowodowany odstępstwem od SOP. Parametry te generują wartość względnej liczby ryzyka na poziomie RPN = 245.

Strategią reakcji na ryzyko będzie jego minimalizowanie przez stały, kwalifikowany nadzór. Stąd do prowadzenia eksperymentów będzie wykorzystywany rozszerzony zespół nadzoru przez kwalifikowanych i doświadczonych specjalistów z Akademii. Pozwoli to na zredukowanie poziomu prawdopodobieństwa materializacji ryzyka wystąpienia potencjalnego wypadku nurkowego do poziomu P = 4 i prawdopodobieństwa detekcji do D = 3. Reakcja na ryzyko spowodowała zmniejszenie względnej liczby ryzyka do akceptowanego poziomu RPN = 84.

Nieadekwatne działanie aparatu nurkowego jest zawsze prawdopodobne. Przeciwdziałanie temu zagrożeniu opiera się na współpracy z Producentem poprzez Partnera przemysłowego w zakresie zmian w konstrukcji aparatu zapobiegającym występowaniu spotkanych nieprawidłowości w działaniu oraz bilateralnej współpracy naukowej z CEPHISMER Tulon w zakresie monitoringu występujących problemów w Marynarce Francuskiej.

Na podstawie analizy dotychczasowych nurkowań eksperymentalnych prawdopodobieństwo awarii aparatu nurkowego oszacowano na poziomie małym: P = 6. A prawdopodobieństwo wykrycia awarii na poziomie detekcji idealnej D = Stąd względna liczba ryzyka jest na poziomie małym RPN = 42. Reakcją na ryzyko jest jego akceptowanie.

Z przedstawionych analiz wynika, że po zastosowaniu reakcji na rozpatrywane rodzaje ryzyka spadła wartość względnej liczby ryzyka RPN. Nieznacznie została obniżona intensywność[165] dla niektórych rodzajów ryzyka w projekcie. Ryzyko rezydualne jest nadal wysokie, więc projekt należy sklasyfikować, jako generujący duże potencjalnie zagrożenie techniczno−medyczne.

PODSUMOWANIE

Ze względu na szczególne wymagania wojskowe technologie nurkowe powinny być możliwie szeroko oparte na wiedzy. W planowanym cyklu badań oparto się na krajowym podejściu faworyzującym deterministyczne metody modelowania półzamkniętych systemów oddechowych SCR stanowiącej element systemu nurkowania z wykorzystaniem aparatu nurkowego typu SCR CRABE SCUBA. Zagadnienia wentylacji przestrzeni oddechowej aparatu SCR CRABE SCUBA zarówno premiksem jak i tlenem są problemami kluczowymi dla projektu, dlatego stanowią główną kanwę prowadzonych badań. Przy budowie tego systemu zastosowano podejście procesowe oraz metody inżynierii systemów. W warunkach krajowych walidacja przyjętych teorii metodami wnioskowania w oparciu o rozkład binominalny nie jest możliwa do przeprowadzenia, stąd wnioskowanie oparto o analizę sekwencyjną [23].

Realizowany projekt dotyczy technologii nurkowań MCM realizowanych w szerokim zakresie głębokości, jako elementu systemu wojny minowej. Nurkowania powinny być prowadzone od powierzchni do ok. 80 mH_2O a do pokrycia różnych zakresów głębokości wykorzystywany będzie tlen do dekompresji oraz różne mieszaniny Nitroksowe do głębokości 50 mH_2O, zaś głębiej mieszaniny na bazie helu[166]. Dekompresja zasadniczo powinna być akcelerowana przez wykorzystanie tlenu. Szczególnie istotnym wydaje się kontekst wykorzystania technologii nurkowych jako elementów systemu wojny

minowej. Należy dążyć do tego aby konserwatyzm technologii stwarzał zagrożenie w granicach[167] (1;3)% zagrożeniu DCI przy szacowaniu go, jak dla zagrożenia epidemiologicznego. W projekcie nie zakładano badań nad możliwościami podejmowania nurkowań powtarzalnych czy powtórzeniowych.

Przy realizacji projektu zwracana będzie uwaga na wybrane problemy higieny życia i pracy nurka oraz treningów adaptacyjnych. Wypracowane procedury SOP wynikające z poprzednio prowadzonych prac oraz przepisów będą zachowywane i w miarę konieczności rewidowane.

Zadaniem projektu jest opracowanie technologii nurkowań punktowych. Takie podejście wymaga zarówno opracowania technologii nurkowań uwzględniającej brak wykonywania dodatkowej pracy przez nurka, gdzie głównym problemem jest zagrożenie możliwością wystąpienia objawów ośrodkowego zatrucia tlenowego CNSyn, oraz nurkowań wysiłkowych wykonywanych w sytuacjach awaryjnych, stwarzającym potencjalne zagrożenie wystąpieniem objawów choroby ciśnieniowej DCS.

Z tradycji kultywowanej w Marynarce Wojennej RP wynika, że system dekompresji powinien być zabezpieczony systemem umożliwiającym realizację procesu dekompensacji w warunkach utrudnionych. System taki powinien składać się z procedur hiperbarycznych, oraz zawierać wymagane uzbrojenie techniczne i medyczne do ich przeprowadzenia łącznie z procedurami ewakuacji nurka do specjalistycznego ośrodka hiperbarycznego czy szpitala. Układ elementów systemu zabezpieczenia realizacji procesów leczniczych może być zapożyczony, lub opracowany na nowo. System tabel rekompresji leczniczej powinien przewidywać procedury lecznicze na wypadek „wyrzucenia" nurka ze znacznych głębokości z pominięciem stacji dekompresyjnych.

Wykorzystanie aparatu nurkowego o półzamkniętym obiegu czynnika oddechowego i mieszanin o podwyższonej zawartości tlenu wymaga opracowania procesu rekrutacji nurków i utrzymania ich w kondycji. Zagrożenie wystąpieniem objawów choroby ciśnieniowej oraz objawów ośrodkowej toksyczności tlenowej przyjęto na wyższym poziomie niż dla nurków rekreacyjnych.

Ważnym parametrem operacji nurkowej jest możliwość obciążania nurka pracą, która jest powiązana z procesem wentylacji przestrzeni oddechowej aparatu, a także z procesem dekompresji i narastania zagrożenia ośrodkową toksycznością tlenową.

Niezależnie od momentu czasu i głębokości przejścia na dekompresję tlenową należy poszukiwać efektywnej procedury dla procesu płukania przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego tlenem. Bezpośrednio od jej skuteczności zależeć będzie algorytm akceleracji dekompresji. Oczywiście należy rozpatrzyć sposób powtórnego przejścia w dowolnym momencie z dekompresji tlenowej na dekompresję z wykorzystaniem mieszaniny gazowej.

System prowadzenia prac podwodnych może nie przewidywać możliwości prowadzenia nurkowań powtarzalnych, powinien jednak normować czas odpoczynku jaki powinien upłynąć do powtórnego nurkowania.

Predefiniowanie algorytmu utrzymania stałego, założonego składu wdychanego przez nurka czynnika oddechowego przez aparat nurkowy wymaga poczynienia założeń dotyczących parametrów osobniczych nurka, które nie zawsze muszą być spełnione, stąd nurkowie powinni być badani pod kątem ich spełnienia. Parametry osobnicze nurka ulegają zmianie wraz z wiekiem nurka i stopniem przygotowania/wytrenowania. Wydaje się dobrą praktyką sprawdzanie kluczowych dla bezpieczeństwa parametrów osobniczych nurka podczas każdego szkolenia na wyższe uprawnienia nurkowe.

W procesie analizy bezpieczeństwa nurkowania w Marynarce Wojennej RP kluczowe jest odpowiednie przygotowanie kondycyjne, wydolnościowe i dekompresyjne nurka, gdyż parametry osobnicze nurka ulegają czasami znacznym fluktuacjom w skutek treningu adaptacyjnego lub jego zaniechania. Kontrola parametrów osobniczych nurka możliwa jest podczas obowiązkowych treningów, gdy odbywają się one przy wykorzystaniu wysiłkowych symulatorów hiperbarycznych, najlepiej hiperbarycznych symulatorów pływania czy wykonywania prac podwodnych[168], stanowiąc element zapobiegania sytuacjom potencjalnie niebezpiecznym.

WNIOSKI

Naukowe podejście polega na tyle dokładnym poznaniu zachodzących procesów w badanym systemie, aby możliwe było prognozowanie jego zachowania w przyszłości[169] z zadawalającą wiarogodnością[170].

W projekcie zastosowano podejście procesowe do opracowania teorii dającej możliwość planowania działań podwodnych. Ustanowiony w projekcie wiarogodny[171] model deterministyczny dla ergonomicznego systemu człowiek−maszyna daje możliwość predykcji[172] z wystarczającą wiarogodnością. Opisany proces modelowania deterministycznego ze swej natury umożliwia ciągłe poprawianie precyzji predykcji oraz szacowanie poziomu zagrożenia, przy zdiagnozowaniu odchyleń od powtarzalności czy precyzji modelu. Jest to ważne, gdyż ze względu na szczególne wymagania, wojskowe technologie nurkowe powinny być możliwie szeroko oparte na wiedzy. o jej opublikowaniu wiązała się z odpowiedzią na pytania kwestionujące sens podejmowania projektu. Dokumenty projektu były wielopoziomowo oceniane przez różne instytucje także niezależnych ekspertów naukowych. Opinie podważające zasadność podjęcia decyzji o uruchomieniu projektu godzą w ich autorytet. Większość z decydentów jest mi nieznana, lecz ochrona wyników ich pracy jest moją powinnością z racji roli kierownika projektu. Mam nadzieję, że postawy negujące podjęte decyzje wynikały jedynie z nieświadomości jak głęboki i dokładny był proces myślowy leżący u podstaw podjętej decyzji.

Informacja o projekcie jest w swej naturze informacją publiczną i wszelkie instytucje oraz osoby posiadające wiedzę na ten temat są zobowiązane do odpowiedzi na zadawane pytania. Opracowany wniosek o podjęcie projektu stanowi w Polsce dobro prawnie chronione, stąd najlepszą drogą jego ujawnienia jest publikacja naukowa autora. Stąd jeśli nadal będzie zapotrzebowanie na dalsze wyjaśnienia, to na przeszkodzie dalszego ujawnienia założeń do projektu stoi jedynie aprobata czasopisma drukującego tak obszerny materiał.

LITERATURA

1. Kłos R. Designing of diving technologies – process approach. Polish Hyperbaric Research. 2019, Tom 66, 1, strony 7-24.
2. Huggins K.E. The dynamics of decompression workbook. Ann Arbor : The University of Michigan, 1992.
3. Kłos R. Securing the hyperbaric treatment of decompression sickness in the Polish Navy. Polish Hyperbaric Research ISSN 1734-7009; e-ISSN 2084-0535. 2018, Tom 65, 4, strony 7-23. Polish-English Bilingual Publication.
4. —. Możliwości doboru ekspozycji tlenowo-nitroksowych dla aparatu nurkowego typu AMPHORA - założenia do nurkowań standardowych i eksperymentalnych. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2012. ISBN 978-83-924989-8-8.
5. Predictive studies IV. Work capability and physiological effects in He-O2 excursions to pressures of 400-800-1200-1600 fsw. Philadelphia : Institute for Environmental Medicine University of Pennsylvania, 1978. Report 78-1.
6. Report of proceedings Technical Symposium on The human factor in North Sea operational diving:. Proceedings Technical Symposium on The human factor in North Sea. Heathrow : Hotel London, 4-5 Nov1976.
7. Lambertsen C.J. Studies in isobaric counterdiffusion . Filadelfia : Institute for Environmental Medicine , 1986.
8. Kłos R. Pollutions of the hyperbaric breathing atmosphere. Scientific Journal of Polish Naval Academy. 2017, Tom 208, DOI: 10.5604/0860889X.1237621, strony 31-44.
9. Kłos, R. Wapno sodowane w zastosowaniach wojskowych. Gdynia : brak nazwiska, 2009. ISBN 978–83–924989–5–7.
10. Kłos I. i Kłos R. Polish Soda Lime in military applications. Oświęcim : Chemical Company DWORY S.A., 2004. ISBN 83-920272-0-5.
11. Bennett P.B., Elliott D.H. The physiology and medicine of diving. London : W.B. Saunders Company Ltd., 1975. ISBN 0-7020-0538-X.
12. Brubakk A.O., Neuman T.S. Bennett and Elliott's physiology and medicine of diving. brak miejsca : Saunders, 2003. ISBN 0-7020-2571-2.
13. Kłos R. Aparaty Nurkowe z regeneracją czynnika oddechowego. Poznań : COOPgraf, 2000. ISBN 83-909187-2-2.
14. —. Modelowanie procesów wentylancji obiektów normo- i hiperbarycznych. Gdynia : Akademia Marynarki Wojennej, 2007. Rozprawa habilitacyjna. PL ISSN 0860-889X nr 160A.
15. PN-EN-14143. Sprzęt do nurkowania. Autonomiczne aparaty do nurkowania z obiegiem zamkniętym. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2005. ICS 13.340.30; 97.220.40.
16. Frånberg O. Oxygen content in semi-closed rebreathing apparatuses for underwater use: Measurements and modeling. Stockholm : School of Technology and Health, 2015. ISSN 1653-3836.
17. Kłos R. Inherent unsaturation. The risk of central nervous system oxygen toxicity part 1. Polish Hyperbaric Research. 1, 2014, Tom 46, DOI: HTTP://DX.DOI.ORG/10.13006/PHR, strony 37 – 64.
18. —. The he pathophysiology related to the toxic effect of oxygen. the hazard of central oxygen toxicity part 2. Polish Hyperbaric Research. 2014, Tom 47, HTTP://DX.DOI.ORG/10.13006/PHR.47.2, strony 15-34.
19. —. Survival analysis. The risk of central oxygen toxicity part 3. Polish Hyperbaric Research. 3, 2014, Tom 48, DOI: HTTP://DX.DOI.ORG/10.13006/PHR.48.3, strony 33 – 48.
20. —. The hazard of central oxygen toxicity occurrence. The risk of central oxygen toxicity part 4. Polish Hyperbaric Research. 4, 2014, Tom 49, DOI: HTTP://DX.DOI.ORG/10.13006/PHR.49.2, strony 19 – 31.
21. Shykoff B. Performance of various models in predicting vital capacity changes caused by breathing high oxygen partial pressures. Panama City : Navy Experimental Diving Unit, 2007. NEDU Report TR 07-13.
22. Gerth W.A. Overview of survival functions and methodoology . [aut. książki] Weathersby P.K. Gerth W.A. Survival analysis and maximum likelihood techniques as applied to physiological modeling. Kesington : Undersea and Hyperbaric Medical Society Inc., 2002.
23. Kłos R. Zastosowanie metod statystycznych w technice nurkowej - Skrypt. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2007. ISBN 978-83-924989-26.
24. Donald K.W. Oxygen poisoning in man part I. British Medical Journal. May 17, 1947, strony 667-672.
25. Donald K. Oxygen and the diver. Harley Swan : The SPA Ltd., 1992. ISBN 1-85421-176-5.
26. Harabin A.L. Human central nervous system oxygen toxicity data from 1945 to 1986. Bethesda: Naval Medical Research Institute, 1993. NMRI 93-03; AD-A268-225.
27. NOAA. NOAA diving manual - diving for science and technology. [red.] Administration National Oceanic and Atmospheric. VI. Flagstaff : Best Publishing Co., 2017. ISBN 9781930536883.
28. Bühlmann A.A. Decompression-Decompression sickness. Berlin : Springer-Verlag, 1984. ISBN 3-540-13308-9; ISBN 0-387-13308-9.
29. Kłos R. Możliwości doboru dekompresji dla aparatu nurkowego typu CRABE - założenia do nurkowań standardowych i eksperymentalnych. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2011. ISBN 978-83-924989-4-0.
30. —. System trymiksowej dekompresji dla aparatu nurkowego typu CRABE. Gdynia: Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2016. ISBN 978-83-938322-5-5.
31. Wald A. Sequential Analysis. New York : Jon Willey & Sons, Inc., 1947.
32. Kłos R. Test tolerancji tlenowej. Polish Hyperbaric Research. 2013, Tom 45, 4, strony 69-78.
33. PN-EN 60812:2009. Techniki analizy nieuszkadzalności systemów Procedura analizy rodzajów i skutków uszkodzeń (FMEA). Warszawa : Polski Komitet Normalizacyjny, 2009. ICS 03.120.01; 03.120.30; 21.020.
34. Kłos R. Diagnozowanie ryzyka na przykładzie wyższej uczelni technicznej. Logistyka. listopad-grudzień, 2013, 6, strony CD1: 275-294.

35. —. Katalityczne utlenianie wodoru na okręcie podwodnym. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2015. ISBN 978-83-938-322-3-1.
36. Abysmal Diving Inc. Advanced Dive Planning Software. [CD] 6595 Odell Place, Suite G. Boulder Colorado, 80301: Abysmal Diving Inc., 2001. ABYSS-2000 v.2.30.17.
37. von Ahsen A. Cost-oriented failure mode and effects analysis. International Journal of Quality & Reliability Management 25: 2008 . 2008, Tom 25, DOI: 10.1108/02656710810873871, strony 466-476.

dr hab. inż. Ryszard Kłos, prof. nadzw.
AMW Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte
Zakład Technologii Prac Podwodnych
81 – 103 Gdynia 3
ul. Śmidowicza 69
Tel: +58 626 27 46

ORCID identifier No: 0000-0002-4050-3978

[1] metodyka to zbiór zasad dotyczących sposobów prowadzenia wybranych procesów,
[2] Semi-Closed Rebreather Self-Contained Underwater Breathing Apparatus,
[3] technologia rozumiana jest tutaj jako optymalizacja systemu dla danego procesu,
[4] chyba, że zostaną skierowane wnioski o ich dokładniejszą interpretację,
[5] wynikającej z taktyki,
[6] na drodze różnych analiz, jak studium wykonalności, konkurencyjności czy analizy ryzyka,
[7] system, w którym zastosowano więcej elementów, niż to jest konieczne ze względów funkcjonalnych, w celu zwiększenia jego niezawodności,
[8] choć wcale tak być nie musi,
[9] Mine CounterMeasure,
[10] czyli małym prawdopodobieństwem wystąpienia nawet ograniczonych symptomów DCS (DeCompression Sickness),
[11] wolniejszy dla procesu dekompresji,
[12] w piśmiennictwie polskim ten sposób postępowania nazywany jest dekompresją wydłużoną,
[13] konserwatyzm będzie wynosił 100% dla gradientu wynoszącego 30% wartości maksymalnego przesycenia a 0% dla 70% wartości tego gradientu,
[14]Decompression Illness, jako pojęcie szersze od DCS, przykładowo uwzględniające ośrodkowe zatrucie tlenowe CNSyn (Central Nervous Syndrome),
[15] usprawnienia osób niepełnosprawnych,
[16] umożliwienie osobie z niepełnosprawnością uczestniczenie w życiu, społecznym i sportowym, na poziomie zbliżonym do innych osób z podobną niepełnosprawnością; przykładowo, nurkowania osób bez niektórych kończyn czy kluby nurkowe diabetyków,
[17] przykładowo awarii dźwigu, wyciągarki, pojazdu podwodnego, wystąpienia wybuchu, przesunięcia wraku czy jego elementu itp.,
[18] taka sytuacja występuje przy ratowaniu nurka przez jego nurka zabezpieczającego podczas każdego typu nurkowania,
[19] Explosive Ordinance Disposal,
[20] Special Response Team,
[21] dotyczy to działań w warunkach pokoju przy zwalczaniu terroryzmu, lecz przy podejmowaniu działań asymetrycznych przeciwnika aprobowany apetyt na ryzyko może osiągać znacznie wyższe wartości,
[22] niektóre kraje stosują procedury szacowania zagrożenia i dobierania go według oceny sytuacji taktycznej,
[23] awaryjnie do głębokości $60\ \mathrm{mH_2O}$,
[24] możliwe wydaje się także wykorzystanie neonu,
[25] powyżej 1% lecz nie więcej niż 3%,
[26] Decompression Sickness,
[27] gdyż najczęściej w celu intensyfikowania dekompresji używane są możliwie wysokie ciśnienia cząstkowe tlenu,
[28] przykładowo, czasu odpoczynku przed nurkowaniem czy niezakłóconego snu w nocy poprzedzającej nurkowanie,
[29] bez względu na czas pobytu na niej,
[30] ciekawym rozwiązaniem może być zastosowanie Neoksu,
[31] przykładowo, przy wchodzeniu do dzwonu nurkowego,
[32] Human Factors,
[33] Ventilatory Equivalent for Oxygen,
[34] w znaczeniu zjawisk fizycznych lub psychicznych będących przedmiotem poznania doświadczalnego,
[35] umownie klasyfikowano nurków na „delikatnych" i „odpornych" na warunki forsownej dekompresji,
[36] aktualnym nastawieniem do nurkowania,
[37] odporność na wpadanie w panikę, melancholię, przygnębienie czy rezygnację nie jest równoznaczna z umiejętnością trzeźwej oceny sytuacji, jasnego korzystania z zasobów wiedzy i podejmowanie efektywnych działań w warunkach stresu,
[38] oczy stanowią „zwierciadło duszy",
[39] napięcie mięśni czy drżenie można sprawdzić przy sprawdzeniu oporządzenia mimochodem dotykając mięśni czy położeniu dłoni na ramieniu,
[40] nie tylko akcji serca ale i wypełnienia,
[42] sprawdzenie czy nurek pamięta i ma łatwy dostęp do zaworów, przełączników, zegarka, panelu, noża itp.,
[43] dekompresja nie kończy się z chwilą osiągnięcia powierzchni, lecz stan równowagi z atmosferą oddechową osiągany jest na drodze powolnej dekompresji izobarycznej, po nurkowaniach saturowanych proces ten jest najdłuższy,
[44] do jednej godziny po zakończeniu poprzedniej dekompresji,
[45] ponad jedną godzinę od zakończenia poprzedniej dekompresji,
[46] czas klirensu (od clearance),
[47] nie musi to być atmosfera powietrzna, gdyż nurek może oddychać na powierzchni, przykładowo z inhalatora tlenowego,
[48] zapewnia to, przykładowo sięgnięcie po wyrwany z ust ustnik, dostęp do zaworów, ewentualnie wałęsających się linek, roślinności, które mogą oplątać nurka itp.,
[49] w akwenach może dojść do stratyfikacji temperatury w warstwach wody, w termoklinie następuje szybka zmiana temperatury wraz ze zmianą głębokości,
[50] przykładowo, podczas wykonywania prac transportowych czy podczas wypoczynku polegającym na plażowaniu,
[51] Standard Operating Procedures,
[52] vasoconstriction,
[53] w obrocie znajduje się tlen 6.0N co oznacza 99,9999% tlenu w gazie,
[54] choć i w takim przypadku zawartość zanieczyszczeń rośnie wraz ze wzrostem „przestrzeni martwych",
[55] washout period,
[56] płukanie przestrzeni oddechowej aparatu nurkowego podczas pobytu na dnie jest niepożądane ze względu na bezpośrednią bliskość miny lub systemów detekcji i zwalczania nurków,
[57] przykładowo, nurkowi łatwiej jest podwoić przewidziany czas dekompresji tlenowej i przejścia jej przy wykorzystaniu mieszaniny operacyjnej przy awarii zasilania tlenem niż przeliczać ten czas według innej formuły,
[58] bardziej konserwatywnych,

[59] nurek pomija pewną część dekompresji by po wynurzeniu i ograniczonym czasowo przebywaniu na powierzchni, zostać powtórnie sprężonym i odbyć dalszą dekompresję w komorze dekompresyjnej,
[60] czyniąc go bardziej konserwatywnym,
[61] sztuczne powiększenie czasu pobytu na dnie,
[62] ten wariant technologii uwzględnia sytuację awaryjną, gdy nurek musi wykonywać pracę, np. przeciwstawienia się prądom morskim,
[63] Treatment Tables,
[64] jak przejście z wynikiem pozytywnym testu tolerancji tlenowej,
[65] zazwyczaj dla nurkowań rekreacyjnych zagrożenie podaje się na poziomie $p = 1\%$ a dla nurkowań bojowych $p \leq 5\%$ z istotnością $\alpha = 0{,}01$,
[66] poza strefą saturacji wydatkowanie większego wysiłku jest niebezpieczne,
[67] spoczynek będzie potrzebny przy wykonywaniu prac minerskich bądź wymuszony sytuacją taktyczną związaną z koniecznością ograniczenia emisji hałasu, lecz w takim przypadku należy rozpatrzyć problem wzrostu zagrożenia zatruciem tlenowym,
[68] przykładowo o otwartym obiegu czynnika oddechowego,
[69] przykładowo, w postaci dodatkowych aparatów zabieranych przez nurka czy podwieszanych w toni wodnej,
[70] można dodać wiele dodatkowych elementów systemu, jak podsystem komunikacji podnoszący komfort psychiczny, mający niebagatelny wpływając na procesy dekompresji,
[71] przyspieszenia,
[72] przykładowo, gdy nastąpi awaria zasilania tlenem,
[73] podwieszane w toni lub zabierane przez nurka dodatkowe aparaty oddechowe,
[74] według praktyki Kanadyjskiej, jednak w Polsce dopuszczano przerwę do $5\ \mathrm{min}$.,
[75] w takim przypadku istnieje znacznie większa pewność, że nurek dotrze na czas do komory dekompresyjnej,
[76] takie konstrukcje spotykane są dla systemów oddechowych zasilanych przewodowo, przykładowo $\mathrm{Polycom}\ 101$ produkcji Drägerwerk AG Lübeck,
[77] przykładowo, narażenia na narkozę azotową,
[78] przykładowo, przy zanurzaniu i pobycie na dnie użyty zostanie $\mathrm{Trimiks}$ a w procesie dekompresji zastąpiony zostanie on $\mathrm{Nitroksem}$ a później tlenem,
[79] nie zawsze ciśnienia cząstkowe gazów komponentów czynnika oddechowego $(p_1 .. p_j, p_i)$ muszą zmieniać się płynnie ze zmianą głębokości H, gdyż aparat nurkowy może realizować algorytm utrzymania stałego ciśnienia cząstkowego danego gazu przez dostosowaną zmianę jego zawartości podczas zmiany ciśnienia, jak aparaty realizujące stałe ciśnienia cząstkowe tlenu p_i: $\mathrm{Mk}15/16$,
[80] nie dotyczy to nurkowań z plateau saturacji,
[81] dostarczanie tlenu może być także realizowane poprzez jego dostarczanie do obiegu wraz z innymi komponentami czynnika oddechowego,
[82] przykładowo, szarpania się podczas napadu paniki,
[83] element wykonawczy sytemu automatyki, który realizuje predefiniowany proces reakcji na wymuszenie,
[84] często pod kontrolą elektroniczną,
[85] obniżenie akcji oddechowej u wytrenowanych sportowców w stosunku do średniej,
[86] obniżenie akcji serca u wytrenowanych sportowców w stosunku do średniej; efekt ten pogłębiany jest przy imersji wodnej (w odróżnieniu od imersji w środowisku wirtualnym, sztuce czy kulturze),
[87] nie chodzi tu o trening nurkowy, lecz trening adaptacyjny do uprawiania innych aktywności,
[88] w warunkach rzeczywistych takie sprawdzanie jest jak dotąd trudno realizowalne,
[89] technologia powinna posiadać zadeklarowany apetyt na ryzyko, który bezpośrednio wynika z kontekstu taktycznego,
[90] External/Auxiliary Breathing System, awaryjny system oddechowy “ponny” itp.,
[91] ze względu na zabezpieczenie cieplne zapobiegające wyziębieniu i przegrzaniu a przez to mające wpływ na zagrożenie tlenową formą zatrucia tlenowego CNSyn,
[92] opracowane zostały analizatory składu/ciśnienia cząstkowego tlenu oraz zawartości ditlenku węgla stanowiące opcjonalne wyposażenie dla aparatu $\mathrm{SCR\ CRABE\ SCUBA}$,
[93] teoria i praktyka posługiwania się sprzętem i wyposażeniem dla osiągnięcia zamierzonego celu,
[94] Mine Countermeasure,
[95] Explosive Ordnance Disposal,
[96] Improvised Explosive Device Disposal,
[97] Mine Countermeasures Vessel,
[98] Autonomous Underwater Vehicle,
[99] Unmanned Undersea Vehicles,
[100] Remotely Operated Underwater Vehicle,
[101] stanowiący pojazd zwiadowczy operujący z okrętu,
[102] Autonomous Surface Vehicle,
[103] Network Centric Warfare,
[104] MCMV z reguły potrzebują osłony innej klasy okrętów i lotnictwa,
[105] nurkowie MCM mogą być przykładowo wykorzystywani do: uwalniania zaplątanych elementów wyposażenia MCMV, stropowania przy wyławianiu torped ćwiczebnych strzelanych przez okręty podwodne, wyławiania lub niszczenia niezdetonowanych samobieżnych lub zrzucanych ładunków wybuchowych itp.,
[106] także skrycie, przykładowo przez okręty podwodne,
[107]przykładowo, infrastruktury zabezpieczającej przed działaniami rozpoznawczymi lub desantowymi,
[108] Unexploded Ordnance,
[109] technologia nurkowania dotycząca takich działań powinna różnić się od typowo wojennej oraz ćwiczebnej,
[110] przykładowo przez raptowne odciągnięcie przez szybką łódź, zdmuchnięcie podmuchem skierowanym ze specjalnej armatki itp.,
[111] przykładowo kurtyn powietrznych pod wodą czy rękawów wodnych, obkładania gumą, plastikiem tłumiącym falę uderzeniową, wykorzystywanych na lądzie,
[112] działania polegające na zniszczeniu elektroniki lub zagłuszaniu sygnałów wewnętrznych i zewnętrznych,
[113] kołkiem drewnianym plastikowym, ołowiem, strumieniem wody itp.
[114] Explosively Formed Penetrator,
[115] Przyjmując, jako wariant alternatywny operacji uderzenie z wprowadzeniem w pierwszej linii jednostek mogących wystrzelić ładunki wydłużone i przepalić drogi dojścia lub utorowanie przejść przez uderzenie sił powietrznych lub rakietowych w celu przepalenia przeprawy. Jednak uderzenie naraża operację na konieczność podjęcia boju, do którego przeciwnik może być przygotowany. Siły przeciwnika są w stanie wykryć i przeciwdziałać siłom szpicy uderzeniowej czy atakowi z powietrza. Oprócz tego zachowanie skrytości do chwili podjęcia desantowania nie może być spełnione. Dodatkowo, jeżeli poniesione zostaną znaczne starty własne, to pomimo pomyślnego przełamania zajęcie bronionego terenu lub prowadzenie pościgu może nie mieć szans powodzenia. Rozważenie użycia oddziałów SRT czy MCM do skrytego rozpoznania i zaminowania przeszkód, pomimo ok. 100% zagrożenia związanego z brakiem możliwości odzyskania pododziału nurków, jeśli istnieje prawdopodobieństwo wykonania zadania z 70% pewnością przy 95% poziomie ufności wydaje się uzasadnione z punktu widzenia ekonomii prowadzenia działań bojowych pod warunkiem, że ewentualne wykrycie aktywności podwodnej może być natychmiast skompensowane wprowadzeniem realizacji wariantu przełamania,
[117] przykładowo, postaci pływającego pierścienia,
[118] przykładowo, posiadającej zdolność do przemieszczania się czy zagrzebywania,
[119] około 35 lat temu,
[120] wykorzystanie modeli statystycznych zarezerwowano jedynie do procesu walidacji,
[121] obranie takiej taktyki było trudne, gdyż w powszechnej opinii niemożliwym jest opracowanie wystarczająco dokładnych i wiarogodnych modeli deterministycznych dla tak skomplikowanego systemu interakcji człowiek−maszyna, jak w przypadku nurkowania,
[122] zastosowano typowe podejście analityczne, które wymaga syntezy opracowanych modeli i walidacji przy wykorzystaniu modelu statystycznego,
[123] najczęściej objętości przestrzeni wentylowanej,
[124] ε −moduł oddechowy stanowi stosunek konsumpcji tlenu do wentylacji płuc $\varepsilon(H) = \dot{v}/\dot{V}_E$ odniesiony do głębokości nurkowania H,
[125] rekomendowanych może być co najmniej kilka: neo-haldanian, RGBM, VPM itp.,
[126] stosunek strumienia konsumowanego tlenu $\dot{v}$ do strumienia wentylacyjnego $\dot{V}_E$: $\varepsilon = \frac{\dot{v}}{\dot{V}_E}$,
[127] powtarzalności i odtwarzalności z założoną dokładnością na przyjętym poziomie istotności,

[128] przykładowo, podobną do roli objętości wentylowanej w modelu wentylacji okrętu podwodnego [14],
[129] reprezentatywność grupy jest ograniczona do nurków spełniających kryteria dla nurków wojskowych oraz mogących występować w roli nurków eksperymentalnych,
[130] w stosunku do zawartości tlenu w premiksie x_w zasilającym przestrzeń oddechową,
[131] dla ustabilizowanych wartości parametrów oddechowych nurka,
[132] bioróżnorodnością,
[133] Human Factors,
[134] dla anaerobowych jest czynnikiem śmiertelnie toksycznym,
[135] objawy podobne do poparzenia płuc chemikaliami,
[136] w stosunku do ośrodkowego układu nerwowego,
[137] zmniejszenie zawartości czerwonych krwinek, spadek życiowej pojemności płuc, oślepienie tlenowe itp.,
[138] Central Nervous Syndrome,
[139] teoria ta stanowi podstawę badań epidemiologicznych, badania na wymieralnością i bioróżnorodnością, niezawodności maszyn, analizy ryzyka itp.,
[140] powrót do stanu przed ekspozycją tlenową, polegający na dezaktywacji przez mechanizmy biochemiczne potencjalnie niebezpiecznych reaktywnych związków tlenowych w wyniku ekspozycji na wysokie ciśnienia parcjalne tlenu,
[141] używany powszechnie w programach komputerowych do planowania cywilnych nurkowań technicznych [36],
[142] uważanym za niebezpieczny dla szerokiego grona nurków,
[143] możliwość przeprowadzenia dekompresji na ostatniej stacji na głębokości $6\ \mathrm{mH_2O}$, możliwość zaniechania dekompresji tlenowej, możliwość obciążenia dodatkowym wysiłkiem, uwzględnienie poprzednich nurkowań, uwzględnienie typu transportu, uwzględnienie nurkowania w niskiej temperaturze itp.,
[144] odchylenia te występują gdy nurek posiada znacznie rozbudowaną tkankę mięśniową w stosunku do typowej, z tego powodu został odrzucony jeden nurek,
[145] Treatment Tables,
[146] gdyż nurkowania wojskowe wykonywane są w parach,
[147] odtwarzalności i powtarzalności,
[148] przykładowo, w przygotowaniu kondycyjnym nurka, zmniejszeniu skuteczności płukania przestrzeni oddechowej aparatu, złego konfekcjonowania czynników oddechowych lub obniżenia ich wymaganej jakości, złego upakowania pochłaniacza lub obniżenia jego parametrów jakościowych itp.,
[149] przypadków chorobowych o rzadkim przebiegu czy rzadko występujących,
[150] większość elementów systemu pozwalającego na realizację projektu stanowi opisana dalej baza laboratoryjna Akademii Marynarki Wojennej
[151] wdrożenie krajowej technologii nurkowania wynikało z braku niektórych procedur wymaganych tradycją i prawem krajowym, których nie posiada dostarczona z aparatem technologia nurkowania o czym będzie mowa dalej,
[152] Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats,
[153] CPBR 9.5 cel wdrożeniowy 31 Techniczne, medyczne i prawne problemy długotrwałego przebywania człowieka pod wodą na głębokości 120 m.,
[154] CPBR 9.2 cel 17.07 Opracowanie systemu ekspozycji saturowanych w strefie do 100 m i zasad zabezpieczenia badawczo-medycznego nurków,
[155] przy niezależnych nurkowaniach głębokowodnych należy liczyć się z wyrzuceniem nurka ze znacznych głębokości,
[156] przyczynowo−skutkowe,
[157] nurkowie EOD nawet w warunkach pokoju muszą utrzymywać dyżury patroli minerskich,
[158] jak zaznaczono przy okazji opisywania kontekstu taktycznego,
[159] cost-oriented FMEA [37],
[160] tutaj należy rozumieć jako niejednoznacznego,
[161] praca dodatkowa żołnierzy poza godzinami służbowymi jest dopuszczalna prawnie,
[162] przykładowo: zakwaszenie organizmu spowodowane forsownym treningiem, obecność alkoholu w organizmie, niewyspanie itp.,
[163] mieszanina oddechowa zasilająca aparat nurkowy,
[164] Standard Operating Procedures,
[165] Good Laboratory Practice,
[166] wpływ,
[167] możliwe wydaje się także wykorzystanie neonu,
[168] powyżej 1% lecz nie więcej niż 3%,
[169] w warunkach rzeczywistych takie sprawdzanie jest jak dotąd trudno realizowalne,
[170] predykcji,
[171] naturalnym przykładem może być takie poznanie procesów pogodowych zachodzących w systemie atmosfery, aby móc z dostateczną powtarzalnością przewidywać zjawiska pogodowe z zadawalającą precyzją,
[172] dostatecznie precyzyjnego i powtarzalnego do przyjętych zastosowań,
[173] oparte na przesłankach naukowych przewidywania dróg przebiegu przyszłych procesów albo zmian cech systemu,
[174] Critical to Quality.

POLISH HYPERBARIC RESEARCH 2(67)2019
Journal of Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society
Faculty of Mechanical and Electrical Engineering of the Polish Naval Academy

CONTEXT ANALYSIS IN THE DEVELOPMENT OF DIVING TECHNOLOGIES

Ryszard Kłos

Polish Naval Academy, Department of Underwater Work Technology in Gdynia, Poland

ABSTRACT

The previous article described a new approach methodology[1] for work on the development of technology for the use of the SCR CRABE SCUBA[2] type diving apparatus. However, after its publication numerous questions emerged regarding the genesis of the research undertaken, also from foreign partners using the same rebreather. The work on changing the technology of use was preceded by analyses, which were available only to people involved in the decision-making process. Demonstrating all the details of the decision-making process may be tedious, but failing to present them at all might raise justified doubts about the advisability of conducting a long-term research cycle.
This article only presents preliminary analyses. The necessity to perform them resulted from the specific requirements for military technologies[3] which, as broadly as possible, should be knowledge-based. The knowledge-based approach by its very nature allows continuous improvement of the adequacy of the predictions made, the estimation of the level of risk when diagnosing deviations from the repeatability or precision of the model, and the possibility of adapting the technology to the changing requirements of the user resulting from tactical considerations of its use.
Keywords: Semi-Closed Circuit Rebreather, modelling the process of decompression.

ARTICLE INFO

PolHypRes 2019 Vol. 67 Issue 2 pp. 7 - 58
ISSN: 1734-7009 **eISSN:** 2084-0535
DOI: 10.2478/phr-2019-0005
Pages: 52, figures: 1, tables: 5
page www of the periodical: www.phr.net.pl

Publisher
Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

Original article

Submission date: 13.02.2019 r.
Acceptance for print: 20.04.2019 r.

INTRODUCTION

The methods of acquiring knowledge, differences in the analytical and holistic approach to problem solving and the process approach to developing technologies were outlined in the previous article [1]. These issues will not be repeated or further developed in this paper[4].

DIVING PROCESS OBJECTIVE

In each project there should be defined assumptions concerning it's objective; propositions of the process used to achieve it[5]; specification[6] of the minimum and optimal structure for the proposed system that can ensure consistent, stable and effective implementation of the proposed process, taking into account the impact of the process on the environment and the impact of the environment on the system and the occurring process.

Initially, only processes in which the diver's body was exposed to pressure were considered as dives, while dives using single-atmospheric diving suits were considered as the use of an underwater vehicle. Now, due to the required training and the necessity to carry out tasks autonomously, the term diver is also extended to aquanauts using a single-atmospheric suit.

Different goals can be set for the diving process. Depending on the expected end goal of the diving process, an appropriate system should be established which is capable of ensuring the sustainability of the readiness to achieve the diving objectives. Different subdivisions can be applied according to the purpose of the diving process, for instance:

- extreme
- sports
- recreational
- technical
- professional
- rescue
- military
- etc.

The minimum system capable of ensuring the continuous maintenance of the diving process conducted for a specified purpose is merely a theoretical construction. System minimisation most often is applied in extreme dives, which are conducted in order to set a record. Under these conditions, the usual main assumption is to enhance the system with minimum security measures or ensure redundancy[7] of some of the elements of the system[8]. The elements that go beyond the minimum structure of the system to achieve the objective of the diving process are the result of a risk analysis and feasibility study.

Illustratively, the minimisation of the diving system can be analysed using the example of dives performed by sponge divers described in historical travel books.

The minimum system needed to carry out the diving process consists of only a trained diver. The element of the diving training system can be divided into two subsystems: swimming lessons and training in diving whilst holding one's breath. However, the feasibility study shows that a trained diver will work more effectively if he is equipped with a sponge cutter which, according to the risk analysis, can also be used to assist in the protection of the diver. If a diver is well-trained and can withstand a longer period of time with his breath held, then the effectiveness analysis for the diving process in order to harvest sponges shows that he should be additionally equipped with a net for collecting sponges.

The feasibility study shows that sponges are unlikely to grow close to the shore and that the effectiveness of swimming far from the shore is unlikely to be acceptable, thus it is necessary to ensure that the diver is able to travel by boat. When focusing only on the diving system, the boat should be considered as an element of the system environment, i.e. the context surrounding the diving system under consideration. It should be noted that in this context, there are also other elements that affect the diving system for sponge harvesting, which should be taken into account in the feasibility study, such as market demand or the threat of a shark attack.

Subsequent risk analyses, technical feasibility or economic viability studies may relate to the use of an air pump or air compressor, an air supply system with or without filtration, the use of an air supply regulator, the use of a mask, fins, access to health care, social security or pension systems. Defining the objective to be achieved by an established process can thus be used to establish the structure of the system that supports it, taking into account the environmental impact on the system and the impact of the system on the environment.

For the division proposed here, the distinguishing feature of these types of dives is precisely the definition of their different objectives. Extreme dives are usually carried out in order to break records, but they can be a part of a rescue operation or a quickly changing tactical scenario for a combat situation. Typical examples of extreme divers include free diving where a breath holding diver is dragged to an extreme depth riding on a weighted sledge, or alternatively where the diver reaches the desired depth under his/her own effort using fins (either after being initially pushed to a certain depth by the second diver or reaching it by his/her self). Sport dives, in turn, are carried out for competitive purposes. For example, underwater spear fishing championships previously consisted of catching fish in a defined time, though nowadays photographic competitions are more common. Recreational dives are carried out for pleasure. Technical diving originated from the desire to explore greater depths, and for a greater durations than had previously been possible, the achievement of this goal requiring the use of special, complicated equipment. Technical dives are often implemented, as well as extreme dives, to break records of depth, time spent underwater, or exploring some areas, such as wrecks or caves. Professional diving involves the use of a variety of technical equipment for conducting commercial underwater activities. A specific type of professional diving involves operations to save lives. The rescue of property is part of typical commercial professional diving. Life-saving dives are characterised by different dynamics and determination from other types of diving. Moreover, they use other procedures and carry additional equipment for the victims. Technical dives have emerged from military dives, but their purpose is non-military. The objectives of military dives may vary, for example in combat dives the objectives are usually different from MCM dives[9].

According to the aim of the diving process, different approaches are used to build a system ensuring that the process runs smoothly, efficiently and safely.

During underwater works, both divers and diving supervisors prefer to carry out decompression according to low-risk regimes[10], therefore a conservatism function has been introduced into decompression programmes, using e.g. the method of calculation for elevated inert gas content compared to actual, assuming an increased depth compared to the actual depth, assuming longer than actual time at depth, or using an asymmetric model for saturation/desaturation of theoretical tissues[11]. Some programmes use more than one of these methods or a combination of them to increase decompression safety. These methods are called conservative methodologies or are referred to simply as conservatism[12]. Conservatism is often specified by indicating how much longer and deeper the decompression profile should be compared to the actual one. Sometimes you can find a numerical expression for conservatism, e.g.: in percentages related to the saturation gradient[13]. Diving technologies may be categorised according to their level of conservatism.

In the case of extreme dives, the technology of diving is chosen individually for the diver. Most often the concept of conservatism for this type of dives does not occur, as the typical practice is to exceed the typical safety limits to which conservatism refers. The occurrence of a diving accident is considered to be part of extreme diving and the security measures are related to the development of treatment systems as close as possible to the place where extreme diving is organised. In technical diving, technology is often dedicated to the task and the current advancement of the divers' training. Often technology, and especially decompression schedules, are selected for the current course of diving by computer systems supporting the process of diving, taking into account changes not only in depth and time of stay, but also variations in temperature, gas consumption or changes in conservatism settings. Technical dives do not cross the threshold of zero conservatism, as is the case with extreme dives. A proportion of technical diving is scientific diving conducted in order to get to know the water environment, both animate and inanimate. Due to the fact that the diving is performed by scientists, also advanced in age, conservatism is selected for them individually at an elevated level.

In sports diving, the level of conservatism exceeds the typical conservatism level of 30%, which is the limit for diving with safe, albeit strenuous, decompression. It is consensually agreed and is identical for all diving participants. The differences lie in the way of preparing for the sports diving process, which constitutes a hidden handicap of individual competitors.

In the case of recreational diving, the level of conservatism is selected in such a way that the risk of diving-related illnesses DCI[14] be lower than 1% in accordance with the estimation as for the epidemiological threat for the entire population admitted to diving by checking compliance with medical standards [2]. Part of recreational diving is rehabilitation diving, less frequently practiced in the form of medical rehabilitation[15], and more commonly in the form of social rehabilitation[16].

In professional diving, medical standards are usually more elaborate and rigorous than in recreational diving. Conservatism is often set at the same level as for recreational diving, but no longer applies to the entire population that can dive, but to a selected population that meets higher requirements than the average individual in the professional diving population. If, for professional dives, the risk of DCI is higher than 1% in the estimation as for an epidemiological risk, for a selected population meeting the special requirements set in medical standards, similarly as in normal procedures of work protection, divers must give informed consent to derogations and the risk incurred should be compensated both in terms of health protection and financial compensation.

Rescue dives are characterised not only by an increase in the risk of an occurrence of the DCI symptoms, but also by the risk of a technical accident due to the failure of the equipment used[17]. Increasing the risk of DCI is only allowed when directly saving lives [18] Hence, most often in rescue operations conservatism is maintained at the level typical for professional diving. This applies of course to the group of strictly selected and trained divers secured by specialists in various fields, needed in the rescue operation.

Military dives are characterised by different levels of risk of DCI. For EOD dives[19] the same rules apply as for rescue dives. For MCM dives, depending on the importance of the mission, it is possible to approve the threat of the occurrence of DCI symptoms from the level of EOD dives to combat missions SRT[20], for which the typical DCI threat is determined at the level[21] of 5% in terms of estimation, as for the epidemiological threat, for a selected population meeting the special requirements set out in medical standards[22].

This shows that military diving technologies should be based as broadly as possible on knowledge. Other technologies can be bought. Even with technical dives, broader but available knowledge is sufficient to make decisions about the risks to be taken, which is enabled by the algorithm embedded in the computer memory to support decision-making about the decompression process used.

The project concerns the MCM diving technology with the use of an independent diving apparatus with a semi-closed circuit of the breathing mix - SCR CRABE SCUBA, carried out in a wide range of depths, as an element of the mine warfare system. Dives should be conducted from the surface to a depth of about 80 mH2O and to cover different depth ranges oxygen for decompression and various nitro-oxygen mixtures will be used, to a depth[23] of 50 mH_2O, whereas at a deeper level helium-based[24] mixtures will be used. The context of the use of diving technologies as elements of the mine warfare system seems to be particularly important. The aim should be to make the technology's conservatism as effective as possible and to create a risk within the limits of[25] (1;3)% in terms of its estimation, as for an epidemiological threat, for a selected population meeting the special requirements set out in medical standards.

PHYSIOLOGICAL CONTEXT

The basic requirements for conducting diving operations using self-contained diving devices result from the risk of decompression sickness DCS[26] and central oxygen toxicity[27] CNSyn.

Among the basic decompression parameters, the following assumptions for exposure can be distinguished:

- maximum planned depth of hyperbaric exposure,
- exposure time at maximum depth,
- breathing mix used,
- diver's predisposition to undergo a hyperbaric exposure.

Usually, the depth H is a complicated functional dependence on the time of exposure t: $H = f(t)$. $H = f(t)$ can be approximated by a pair of parameters: maximum depth of exposure H_{max} and time of stay at maximum depth $t(H_{max})$. An extremely important parameter for planning effective, safe exposure and decompression is the oxygen partial pressure p_i, which is typically a function of the exposure and decompression times t: $p_i = f(t)$. During descent and stay at the bottom, it is most common to use a single operational mixture to supply the diving apparatus, but depending on its design, it can maintain the partial pressure of oxygen p_i within very narrow or very wide ranges.

Planning to perform long-term intensive work in diving operations outside the saturation zone is troublesome due to the lack of possibility to design adequate decompression [3]. Strenuous work induces the need for an adequate response from the diver's body. Most often, the response is to include anaerobic changes causing the formation of lactic acid in the muscles, which by acidifying the blood causes a decrease in the efficiency of oxygen transportation through haemoglobin [4].

These effects differ in individuals θ and for one and the same individual strongly depend on the current training $\theta_i = f(t)$, preparation[28] or even attitude to diving. It is difficult to take some individual parameters into account when planning adequate decompression for the population. During saturated dives time is given for stabilisation prior to the decompression process. This time depends on the type of work performed earlier and can amount to up to 2 days.

As mentioned above, with a simplified approach to the decompression planning process, two parameters are used: the maximum depth of exposure reachedH_{max} and the exposure time at maximum depth $t(H_{max})$, calculated from the beginning of the immersion to the initiation of the decompression process. The maximum exposure depth H_{max} may be reached just for a moment [29] with the decompression process starting from the moment when the pressure can only decrease; except for the required stops at decompression stations. If the stops at the decompression stations become longer, the decompression schedule may also change. This way of planning the decompression process is based on the worst case scenario selection procedure. This increases the conservatism of the adopted decompression procedure in a variable way, depending on the diving conditions and the diving supervisor's approach to decompression planning. It should be noted that an unjustified increase in conservatism may result in inefficiency in the diving process due to the significant oversizing of the decompression process. In accordance with the tradition of the Polish Navy, the project was based on the selection of the decompression process using the worst-case scenario method.

The decompression and compression processes may also occur at constant pressure when the composition of the breathing mix changes [3]. Isobaric decompression processes are accompanied by oxygen decompression. Replacement of the gas mixture with pure oxygen results in the washing out of inert gases by oxygen from the tissues. Oxygen is removed from the body, mainly through metabolic consumption. Isobaric decompression occurs at oxygen decompression stations. Due to its toxicity, oxygen can only be used at relatively shallow decompression stations. It is accepted around the world that oxygen decompression can be started from a depth of 12 mH2O. The Polish Navy has a long tradition of using oxygen decompression starting from 15 mH2O, but in order to maintain interoperability in diving with SCR CRABE SCUBA, oxygen decompression was planned from 12 mH2O, however, the breathing space of the diving apparatus will be ventilated with oxygen as early as 15 mH2O. Decompression can also be accelerated by using oxygen-enriched gas mixtures. The mechanism is similar and the use of such mixtures can begin before the transition to oxygen decompression. However, it is possible to use a mixture other than one enriched with oxygen. For example, by substituting Trimix with Nitrox[30] In such a case, even at constant external pressure, Nitrox will elute helium from tissues and replace it with nitrogen, i.e. the replacement of the breathing mix will cause the phenomena of isobaric decompression. It should be noted, however, that nitrogen is much better soluble in tissues containing fat than helium, so planning a long period of isobaric decompression if the breathing mix is changed from Trimix to Nitrox may prolong the decompression process instead of accelerating it. If this is not taken into account, symptoms of decompression sickness DCS may occur. Such a mechanism of the decompression sickness is known as DCS induced by the counter-diffusion process [5-7].

The diver's predisposition to hyperbaric exposure constitutes a complex of issues that may include:

- physical build,
- physical and mental state prior to diving,
- mental build,
- the current state of training,
- the scope of the hygiene rules applied, etc.

In the past, diver's physical build was a basic parameter allowing him/her to perform military service as a diver or to work as a professional diver. This was related to the types of diving suits. Too tall a diver did not fit in a suit, while for a short diver a reefed suit posed a threat. For example, a crack in the crotch belt in a classic suit caused the escape of the helmet and the inability to release air from the suit leading to a diver being thrown up to the surface or hanging in the depths on a diving hose jammed with underwater obstacles. These days of course it is possible to produce a suit adapted to the diver. In the past, a strong body build was required for a classic diver, because the equipment worn on the surface weighed just under 100 kg and required sufficient physical strength to put it on and enter the water. Nowadays, the equipment and devices for professional divers are much lighter, but still require considerable physical strength to put them on and move around outside the aquatic environment[31]. Also, performing underwater works, although carried out with the use of tools and various types of equipment, often requires considerable physical effort, so that some works have to be performed only under saturation conditions.

The use of semi-closed-circuit breathing apparatus requires certain predispositions. The physiological parameters HF[32] which influence the level of diving safety, are indicated here with the symbol θ. For SCR CRABE SCUBA this is primarily the breathing module[33] ε.

The causes of certain phenomena34, are not always known and should therefore be the starting point for further scientific research. It is commonly believed that older divers require more conservative decompression procedures, but quite a large percentage of divers over 45 years of age exhibit a significant increase in individual immunity to strenuous decompression. This phenomenon

was observed during monitoring of the formation of the free gaseous phase in veins during experimental dives, although earlier cases of individual immunity to difficult decompression had been noted[35].

This phenomenon does not occur only as an individual property θ_i, but it can change with the current psychophysical state[36] of the diver. The influence of attitude or determination is not only observed when diving. There are many reliable attitude-related events, such as the occurrence of the phenomenon of imaginary pregnancy in humans and animals. It is believed that the diver is built up in 80% of his/her mental structure, especially the ability to operate effectively in stress and resistance to panic[37]. There is also a conviction that attitude is correlated with immunity to central oxygen toxicity CNSyn. It was also attempted to promote the view that deep knowledge-based consciousness is a contribution to facilitating the development of anxiety leading to panic in stressful situations. Indeed, it is observed that less educated divers show greater resistance, but once the fear barrier is broken, the development of stressful situations leading to the emergence of panic is extremely violent.

Experienced dive supervisors try to gain the trust of divers to become their trustees, which makes it easier for them to assess the current psychophysical condition of the diver. When assessing this state, it is important not to underestimate any symptoms, not even minor ones. It is good practice for the supervisor to have eye contact with the diver[38] during the preparation for diving, with simultaneous examination of the state of muscle tension, body tremor[39] or evaluation of the heart rate[40] etc. It is important to check the coordination of movement once the equipment is put on[41].

It is important to detect signs of fatigue, early signs of illness, stress, etc., as they have a direct effect on the safety of decompression.

When repeating a dive, it is important to note the saturation of tissue with inert gases[42] remaining after the previous decompression. Lowering the pressure value, as is the case during flights by airplanes or transport helicopters, may cause a serious imbalance in the pressure of gas in tissues resulting in the occurrence of symptoms of decompression sickness (DCS). The project did not include any studies on the possibility of cyclic dives[43], repeated[44] dives or achieving a state of gas balance between tissues and breathing atmosphere[45] on the surface[46], but during the progress of works such studies may be conducted.

In addition to strength training, ensuring good physical fitness, and flexibility training, ensuring good muscle stretching[47], it is also important to carry out adaptive training. Adaptive training is aimed at preparing the diver for hyperbaric conditions and decompression. Accustoming the body by clearing the path of gas exchange between tissues and respiratory atmosphere contributes to the safety of diving. In the design of the project it will be important to define the scope of such training and guidelines for strength or flexibility training.

Hygiene of life and work of a diver is a broad concept, as are the aforementioned complications resulting from making strenuous effort prior to diving. An important element is to undergo scheduled strength, endurance, stretching or adaptive training. One of the important elements is the aforementioned care for proper rest and anti-stress training. During training, a well-balanced diet is crucial, limiting the possibility of accumulation of adipose tissue, but ensuring an adequate energy load. It is important to provide appropriate micronutrients and vitamins in their natural form rather than in the form of dietary supplements. Dietary supplements or medicines may cause the presence of condensation nuclei in the blood and thus increase susceptibility to easier formation of the free gaseous phase during decompression. However, solutions to this problem will not constitute partial objectives of the project and need to be developed within the framework of other activities.

The basic variants of decompression assumptions may include:

- effort,
- thermal comfort.

It is necessary to always take into account the possibility of additional, unforeseen work, for example related to changes of the hydrological situation necessitating work against the water current. In addition, the effort expended can lead to an imbalance in thermal comfort. For example, if divers have prepared themselves to expend light effort in cold water by wearing appropriately selected thermals, they may overheat in conditions of intense effort. Thermal comfort can also be lost by crossing the thermocline[48] or as a result of prolonging the stay under water. Previously performed effort, lack of sleep, slight infections, overcooling or overheating are often the cause of faster hypothermia in the diver. Overheating usually occurs before diving[49], which later results in a more rapid cooling under water. This is especially relevant to a standby diver prepared for immersion and waiting at the waiting position, therefore, it is necessary to pay attention to his/her protection against overheating, as during the rescue operation the diver may become so exhausted that he or she will only increase the risk.

The effect of excessive, long effort during diving or before diving on decompression has already been highlighted. Thermal comfort also has a significant impact on the safety of decompression. During decompression, the state of saturation with gases is maintained in a metastable equilibrium. Each temperature change causes the disturbance of this equilibrium. Both, cooling during diving and surface decompression in a warm decompression chamber, as well as overheating during diving and decompression under cold conditions cause disturbances of this balance, which may lead to the occurrence of symptoms of decompression sickness DCS.

The main variants of conducting decompression include:

- response to the contamination of the breathing mix,
- reaction to deviations in the composition of the breathing mix,
- acceleration of the decompression process,
- interrupting the decompression process,
- execution of surface and compensatory decompression,
- accumulation of decompression time at deeper stations,
- extension of the decompression process

Contamination of the breathing mixture is always undesirable. The problems related to such contamination have been previously described and will not be analysed in this study [8]. In regeneration devices, carbon dioxide (CO_2) retention and dust emitted by the filling of the absorbent are frequent hazards. Exhaled carbon dioxide

(CO2) may accumulate in the respiratory space as a result of an absorbent either being of a poor quality, not changing the medium frequently enough , or the effect of 'channelling' where the breathing medium slips through the filter bed without coming in to contact with adequate amounts of the absorbent, etc. It is advisable to seek cooperation with a supplier who guarantees that the required quality of the sorbent will be maintained.

Furthermore, adequate laboratory control over the stored sorbent should be maintained. These issues will not be part of the project, but the established SOP procedures[50] resulting from previous work will be maintained and revised as necessary [9]. Sodium lime dusting is associated with its form. Sometimes it is tableted and highly resistant to abrasion and breakage, other times it is loosely formed in various extrusion shapes [10].

A non-dusting form has also been introduced where the sorbent is stabilized in a substrate made of plastic. However, the most common form available in the market is crushed lime which has been sorted (in terms of size of granules) on screens. Such a form is susceptible to dusting the particles due to mechanical shocks, e.g. during transport or packing of scrubbers. For this reason, the sorbent should be dedusted initially on the screens before packing into scrubbers and then on the screens the scrubber should be air washed. During transport of the prepared apparatuses, the lime in the scrubber may be subject to shock and crushing. This phenomenon is accompanied not only by dusting, but also by the formation of passages enabling the regenerated breathing mix to pass through the scrubber without sufficient purification. It is therefore necessary to ensure careful transportation of the rebreathers. Soaking the internal layers of the breathing tubes can be a protection against dust by forming a water film on the internal surface of the tube to which the dust emitted by the filter can adhere. CO2 sorbents are usually a mixture of highly caustic hydroxides and can cause micro burns in the respiratory tract. Due to the possibility of lumping, the sorbent is stored in a dried form, which has a lower CO2 chemisorption efficiency. That is why before use it should be moistened by performing several exhalations into the scrubber. Soaking the tubes also creates an environment to activate the filling of the scrubber. Partial depletion of the sorbent can occur when it is stored in partly unsealed containers or a filter. Additionally, insufficient water tightness of the device may cause the formation of a highly corrosive hydroxide solution during diving, which in turn may cause severe burns to the respiratory tract.

Carbon dioxide accumulated in the circulating breathing mix causes a number of adverse effects, such as: toxic effects, increased respiratory action, constriction of blood vessels[51] in the periphery of the body, relaxation of blood vessels in the brain causing an increase in cerebral blood flow, which leads to a greater sensitivity to the central form of central oxygen toxicity CNSyn [4].

The impact of a general change in the breathing mix composition on decompression was discussed in the context of isobaric decompression and counter-diffusion phenomena. When designing hyperbaric exposures, especially decompression schedules, it is extremely important to take into account the existing fluctuations in the composition of the breathing mix inhaled by the diver. This is particularly important for semi-closed circuit rebreathers, where fresh premix is dynamically mixed with regenerated breathing mix.

Even with oxygen decompression, it is never assumed that the diver will breathe with pure oxygen. Nowadays, high purity oxygen[52], can be used because it is available at a reasonable price, but such a gas allows for decompression in open-circuit apparatuses[53]. In diving devices with a semi-closed circuit there are problems with effective ventilation of the breathing space with oxygen and washing out from the body the inert gases accumulated in the circuit of the breathing mix inhaled by the diver. Therefore, the issues of ventilation must take into account these phenomena and the assumptions related to the effectiveness of the ventilation process must be validated during experimental dives. The issues of SCR CRABE SCUBA's respiratory ventilation with both premix and oxygen are key issues for the project and are thus the main focus of research. In the project it was necessary to take into consideration:

- time of breathing from the rebreather on the surface before the start of the diving process,
- effectiveness of ventilation of the breathing space with fresh premix during the process of descent,
- the influence of body cleansing from inert gases[54] on the composition of the breathing mix inhaled by a diver,
- effectiveness of washing the respiratory space with a fresh premix during the stay on the bottom[55],
- effectiveness of washing the respiratory space with fresh premix before starting the ascent process,
- necessity to wash the respiratory space with fresh premix at decompression stations,
- effectiveness of the process of exchanging the breathing mix with oxygen before commencing oxygen decompression,
- necessity to wash the breathing space with fresh oxygen at oxygen decompression stations.

The ventilation model of the breathing space of the SCR CRABE SCUBA is the main basis for planning safe hyperbaric exposures and subsequent decompression. The evaluation of the effectiveness of the ventilation process should be continued during training on a hyperbaric simulator, where reliable data from the diving process can be collected. The database of conducted dives provides the basis for progress building through knowledge and an important element of diving safety monitoring, on which the periodic safety analysis of diving operations should be based. The effectiveness of flushing the breathing space of a diving apparatus is an important element in assessing the training of divers. The ability to use the procedures for flushing the breathing space of the diving apparatus should be periodically checked during mandatory training on a hyperbaric simulator.

The most common procedure used to accelerate the decompression process is oxygen decompression. It is commonly believed that such an acceleration constitutes a 2.5-fold reduction of decompression time using an operating mixture [11-12]. For safety reasons, this parameter should be determined for a specific case of its use or rounded up to simplify the system[56]. However, rounding leads to less effective[57] decompression schedules, hence there may be a need to generate two or more tables, for example: school, training, combat used for exercises, combat used during warfare, extreme used in anti-terrorist operations, etc., differing in the risk of an occurrence of symptoms of decompression sickness (DCS) or central oxygen toxicity (CNSyn).

Decompression acceleration may concern emergency situations, such as the need to bypass some decompression stations in case of injury or loss of breathing mix. This must be combined with an appropriate compensatory action. Compensatory decompression may involve oxygen exposure in normobaric or hyperbaric conditions, as in the case of the use of surface decompression procedure[58]. Further development of this issue and of the accumulation of decompression time at deeper stations will be discussed in the context of implementation of the decompression process.

In order to increase safety, the Polish Navy traditionally adopts several scenarios for which the decompression process is extended[59], i.e.:

- performance of hard work underwater by a diver,
- diver's feeling of coldness during diving and decompression,
- when a dive is one in a series of dives,
- when the diver is untrained or has an individual predisposition to develop decompression sickness (DCS),
- when the diver is obese or his/her body weight exceeds 80 kg.,
- when the diver is over 40 years of age.

If one of the above difficulties is diagnosed, the conservatism of the approach to decompression is increased by using extended decompression. Extended decompression is based on adopting the next, longer diving time from the table for the same depth[60]. If two of the above circumstances occur, the diving time is increased by moving two lines down. In the case of a greater number of impediments, these are not taken into account and are treated as if there were only two of them. Therefore, the last two lines of the allowed stay times at the bottom, for each depth appearing in the decompression table, play the role of emergency times used only in the extended decompression procedure. Attention is also paid to other factors influencing the increase in the risk of occurrence of the symptoms of decompression sickness DCS – tab. 1.

The task of the project was to develop technologies for point diving. This approach requires both the development of diving technology with planned effort[61], posing a potential risk of developing symptoms of decompression sickness DCS, and technology taking into account the lack of any additional work by the diver, where the main problem is the risk of developing symptoms of central oxygen toxicity CNSyn.

Tab. 1

The main factors that can lead to decompression accidents

1. Reduced blood circulation due to: obesity, hypothermia, physiological decrease of circulatory efficiency (e.g. in elderly people), previous cardiovascular or diving related medical conditions, mechanical pressure (e.g. by diving suit, lack of position changes during decompression) etc.
2. Increase of carbon dioxide content in the inhaled respiratory factor or its accumulation in the body (hypercapnia) caused, inter alia, by: the diver's poor condition, effort, occurrence of dead spaces in the diving equipment, high density of the breathing mix, etc.
3. Considerable effort prior to diving and muscle acidification resulting from the effort. It is recommended to take 3-6 hours rest before diving (depending on the anticipated conditions of proposed dive), and an absolute prohibition of diving by a fatigued diver.
4. Consumption of alcohol prior to diving and before decompression completion (also during compulsory rest on the surface following diving, during isobaric surface decompression). Alcohol reduces the surface tension of the blood, thus facilitating the formation of gas bubbles. It is recommended that 12 hours before and 12 hours after diving, divers refrain from drinking beverages containing alcohol.
5. Dehydration (dehydration) is often trivialised as a factor that may cause decompression problems. Ignoring dehydration can, however, lead to the occurrence of decompression problems despite adherence to other recommendations. Most often dehydration occurs in the following cases: – For prolonged diving in saltwater in a wetsuit. In this case, water is lost through osmosis (particularly important when using suits with open system water heating). – Hydrostatic pressure can cause increased diuresis. – Overcooling of the body can cause increased diuresis. – During breathing with a dry breathing mix, dehydration occurs as a result of evaporation. – Caffeine, theine and alcohol cause increased diuresis. – Some groups of drugs cause dehydration and many cause increased diuresis. Divers may only take medication under the supervision of a doctor. – Fear and nervous tension can cause increased diuresis. Raising of the level of fluids in the body (rehydration) is advisable in order to increase the safety of diving. For this purpose, it is recommended to administer mineral water, vitamin water or fruit juices in limited amounts. A diver should drink a lot of fluids several hours before diving. The pre-diving hydration should take into account the diving conditions. It is not always possible to pass urine freely during diving or decompression. If the diver is decompressed in a dry chamber with the possibility of urination, fluids should be administered also during decompression.
6. Injuries such as tissue discontinuity. In the affected areas, a free gaseous phase can form, not only in the obvious cases of pulmonary barotrauma, but also in the case of minor skin injuries.
7. Diving with symptoms of poor physical and/or mental predisposition, e.g.: symptoms of hangover, sleepiness, fatigue, symptoms accompanying menstruation, headaches, signs of illness, etc. They reduce the concentration of attention and thus create the possibility of a mistake, e.g. when controlling the decompression profile, measuring the depth or time of stay, etc.

Tab. 1 cont.

The main factors that can lead to decompression accidents
8. The use of vitamins, anti-headache medication, oral contraceptives, stimulants or stress relievers, active plant-based medication, e.g. herbal teas, may not be recommended before diving. One of the reasons for the harmful effects of such agents may be "contamination" by maintaining high concentrations of chemicals in the blood. This may lead to an easier formation of a free gas phase in the blood. Some chemicals such as alcohol (alcohol is a component of many liquid drugs, e.g. cough syrups) cause a change in the surface tension of blood, thus facilitating the formation of a free gas phase in the blood.
9. It is important to pay attention to various types of implants and even fillings of treated teeth. Cases of toothache induction with wrongly fitted or wrongly selected fillings are known. In such cases, it is recommended to consult one's doctor about the possibility of diving, and during the treatment of teeth, it is necessary to inform that diving is practiced.

ORGANISATIONAL CONTEXT

In the implementation of independent dives in the marine environment by the Polish Navy, for the classic decompression designed with decompression stations every 3 mH2O, the diving technology should ensure the emergency decompression process with the possibility of having the last decompression station at a depth of 6 mH2O. Such a procedure may be useful in the case of changes in wave height in the diving area or in the event of diving in locations with high average wave heights. In such a situation, the possibility of a diver remaining at the station depth of 3 mH2O is problematic. For organisational reasons, it is best to assume that the duration of the emergency decompression process should be the same as for the basic decompression and the stay at the 6 mH2O station should be the sum of the stay at the 3 mH2O and 6 mH2O stations.

The Polish Navy has traditionally required that the decompression system should permit to compensate for difficult decompression transition conditions, allow for surface decompression, provide for compensatory decompression, etc. Such a system should consist of hyperbaric procedures, including therapeutic procedures, and provide the required technical and medical equipment to carry them out. The system should be supplemented with a subsystem for evacuation of injured divers to a specialist hyperbaric centre or hospital. The elements of the system securing the realisation of therapeutic processes can be borrowed or developed anew and dedicated especially to the system of conducting diving works. Due to the use of autonomous SCUBA equipment, the system of therapeutic recompression tables TT[62] should provide for therapeutic procedures in case of a diver being "thrown" from considerable depths bypassing decompression stations and, as a result, explosive decompression.

The use of semi-closed circuit SCR diving apparatus and mixtures with increased oxygen content requires the development of a recruitment process for divers and maintaining those divers in good physical condition. The system must take into account the health parameters of the divers. The assumption here is that they will be compatible with the requirements for military divers. Additional criteria can also be added to the qualification process[63]. The adopted standard of physiological parameters of a diver is a guideline for the development of a procedure for the implementation of an effective decompression process.

A higher level of risk of developing symptoms of decompression sickness (DCS) than would be considered acceptable for recreational divers was assumed for this decompression process[64]. The system may also include procedures for decompression as for recreational divers, which will be used during training.

Due to the fact of development of technology for the diving process using semi-closed circuit rebreather (SCR), it should include developed and validated effective procedures for the process of breathing space flushing. The technology should assume that there will be no need for the implementation of the breathing space flushing process while at the bottom. However, an effective flushing procedure can always be used in the case of a suspected loss of control over the composition of the breathing mix that the diver is breathing. These procedures increase the oxygen content in the circuit and their effect on the possibility of occurrence of central oxygen toxicity (CNSyn) should be investigated.

An important parameter of a diving operation is the ability to burden the diver with work. The value of workload is related to the process of ventilating the breathing space of the rebreather, as well as to the process of decompression and increasing risk of central oxygen toxicity (CNSyn). In this case, medium-heavy[65] workload and rest[66]. have been assumed. The influence of thermal protection of a diver on the decompression process must also not be overlooked.

Risk analysis shows the need to use emergency breathing subsystems. Emergency breathing systems may be based on the possibility of transitioning to breathing from an integral cylinder set using a redundant[67] breathing system. This process prevents loss of control over the main respiratory system and not the loss of breathing mix reserve. From the perspective of planning the exposure process and subsequent decompression, the use of an emergency respiratory system with a different mode of action from that of the main system should take into account variations in the risk of CNSyn. If it is considered necessary to develop procedures for the use of respiratory systems independent of the rebreather used[68] account should also be taken of the phase of diving for which transition to emergency decompression will be possible.

In order to secure the described basic and emergency processes, it is required to develop a minimal system[69] consisting of:

- procedures for qualification for diving with the intended rebreather and breathing mixtures,
- a specially designed and validated procedure for basic decompression, together with the rules for the workload of the diver,
- specially designed and validated emergency decompression procedures ,
- procedures for flushing the breathing space of the diving apparatus, taking into account the

increased risk of developing symptoms of central oxygen toxicity CNSyn,
- borrowed or newly developed therapeutic procedures in the event of an occurrence of diving sicknesses (DCI),
- hyperbaric and medical equipment to secure the process of treatment of DCI and other possible cases,
- transport subsystem to a hyperbaric facility,
- procedures for estimating the risk of CNSyn,
- an integral emergency breathing subsystem of the rebreather,
- emergency rebreathers,
- diver thermal protection subsystem.

If the requirement for acceleration[70] of the basic decompression process by using oxygen at the last decompression stations is introduced, the system must be further extended not only by a validated procedure for the oxygen decompression process, but also by the elements resulting from the risk analysis carried out for this process.

The decompression procedure will need to determine at what stage it is safe to transition to oxygen decompression due to past exposure and increased oxygen partial pressure, taking into account the resulting increase in the risk of central oxygen toxicity (CNSyn). Regardless of the time and depth of the transition to oxygen decompression, an effective procedure should be sought for the process of ventilating the breathing space of the rebreather with oxygen.

The decompression acceleration algorithm will depend directly on its effectiveness. Of course, it is necessary to consider the procedure of switching from oxygen decompression to decompression using a gas mixture at any time[71]. It is best if the decompression time between the decompression process using a respiratory mixture and oxygen is calculated according to a simple rule. In this case, it is sufficient to specify the duration of the stay at the stations for the basic decompression schedule using oxygen decompression. Emergency decompression using a breathing mixture will be the calculation of the time spent at stations breathing oxygen. The change of the breathing mix during decompression will require the development of rules for flushing the breathing space of the device. In case of a failure of the oxygen supply from the rebreather, it is also possible to consider extending the system with external oxygen breathing systems[72].

The use of an oxygen decompression system and emergency decompression when breathing the circulating breathing mixture may become complicated if the requirement for marine systems, with the last decompression station at 6 mH2O, is maintained. Such a requirement for all decompression schedules may make the primary decompression process too conservative and thus ineffective from the point of view of military diving operations. In this case, it is possible to dispense with this requirement for emergency decompression and to develop two decompression systems depending on whether or not the dive will be protected by other oxygen sources in the event of a malfunction in the supply from the integral cylinder set of the rebreather.

For marine systems, it seems attractive to use the surface decompression process. For some decompression stations, the process of surface decompression enables interruption of the decompression process in water, rapid ascent and entering the decompression chamber. Then the compression and completion of the rest of the decompression is performed on the surface in the decompression chamber. Such a procedure reduces the diver's risk associated with being underwater, but exposes the diver to stress associated with interrupting the decompression process. Evidence shows that interruption of decompression can last up to 7 min[73]. It is a relatively short time for ascent, reaching the decompression chamber, partial removal of the diver's gear and re-compression. Surface decompression systems, as the basic procedures for the decompression process, are used for tethered dives, carried out from a surface platform equipped with a decompression chamber[74]. For independent dives, such procedures only serve emergency functions.

The system for conducting underwater works may not provide for repetitive dives, but should normalise the rest time that should elapse before the next dive.

CONTEXT RELATED TO EQUIPMENT

The most used mixture for supplying open-circuit apparatuses is the premix, which fills the cylinders supplying the demand regulator, although it is possible to have designs that produce the breathing mix during the diving process from gas components[75]. One of the options to consider is an open-circuit apparatuses supplied with air and oxygen, which adjusts the oxygen content x_i in the dynamically composed air-oxygen mixture depending on the diving depth H, similarly as for semi-closed-circuit rebreathers, e.g. the Polish SCR KSZYK SCUBA [13]. In such a case it is necessary to know the function realising the algorithm of mixing gases from components $x_i = f(H)$ and to assess on the basis of oxygen content x_i its partial pressure p_i as well as the partial pressures of other gases $(p_1 .. p_\bullet)$. The partial pressure of oxygen p_i and other gases $(p_1 .. p_\bullet)$ is the basis for estimating decompression, exposure to various forms of oxygen poisoning and toxic effects of gases[76].

The situation will become more complicated if the types of breathing mixes are changed during the diving process[77]. In this case, the possibility of counter-diffusion, including isobaric, should be taken into account. Both the composition of the breathing mix $(x_1 .. x_\bullet, x_i)$ and the partial pressures[78] of its components $(p_1 .. p_\bullet, p_i)$ for the different types of rebreathers can represent complex functions of depth H: $(x_1 .. x_\bullet, x_i) = f(H)$, $(p_1 .. p_\bullet, p_i) = = f(H)$.

Open-circuit apparatuses adapt to the breathing action of the diver, hence the limitations of workload W are related to the training of the diver and the constraints of the breathing system. However, it is not advisable to plan for heavy effort[79] during independent and tethered dives outside the saturation zone for the reasons given above.

In closed-circuit rebreathers, in addition to maintaining the composition of the breathing mix $(x_1 .. x_\bullet, x_i) = f(H, t)$,va function of depth H and time t, the reliability of the algorithm for maintaining the partial pressures of gas components of the breathing mix $(p_1 .. p_\bullet, p_i) \cong$ idem in response to forced actions is important. For example, to changes in the consumption of oxygen $\dot{v}$ as a result of a change in workload W necessitating most often[80] changes in the oxygen stream $\dot{V}_i$ dosed into the respiratory circuit: $\dot{V}_i = f(\dot{v})$.

The devices of this type are designed in such a way as to economize on the supply of the breathing mix,

hence they have to be able to react moderately quickly to forced action. Otherwise, minor fluctuations in the maintenance of a certain depth↑ H ↓ could result in an unjustified loss of the breathing mix. Hence, deviations from the stable oxygen content state$x_i \neq$ idem, for example with rapid changes in the workload[81] W, may cause instability in the algorithm for maintaining the composition of the inhaled breathing mix ↑ $(x_1..x_\bullet, x_i)$ ↓, thus posing an additional risk. The algorithm used in closed-circuit rebreathers is ideal for sustained light effort. Therefore, even with the use of combat oxygen devices, it assumes planning rather low speed of movement during a combat mission. The planned effort should be relatively constant, both based on purely mechanical or electronically controlled mechatronic actuators[82], so that the system of supplementing the deficiencies in oxygen $x_i = f(\dot{v}, H)$ or the breathing mix $(x_1..x_\bullet) = f(H)$, was able to correctly interpret the situation and respond with an adequate action.

In a semi-closed circuit rebreather, fresh breathing mix is dynamically mixed with the regenerated one. Determining the function $(x_1..x_j, x_i) = f(\dot{v}, H, t)$ of the composition $(x_1..x_\bullet, x_i)$ of the breathing mix inhaled by the diver depending on the consumption of oxygen $\dot{v}$, depth H and exposure time t is a fundamental problem when planning safe hyperbaric exposure and subsequent decompression. Most often such devices perform a predefined function to obtain the composition of the $(\dot{v}, H)$ mechanically[83]. Predefining an algorithm to maintain a constant, assumed composition of the breathing mix inhaled by a diver $(x_1..x_\bullet, x_i) = f(\dot{v}, H) = const$ requires the adoption of assumptions concerning the individual parameters of a diver θ and the permitted tolerances for deviations from these values Δθ. Subsequent selection of divers, requires checking the fulfilment of the assumptions underlying the design of the algorithm for maintaining the assumed composition of the breathing mix inhaled by the diver $(x_1..x_j, x_i) = f(\dot{v}, H)$.

The assumed individual parameters θ do not always have to be met by a diver, especially when accompanied by such phenomena as: sports vagotonia[84], bradycardia[85], significant muscle tissue development, being overweight or underweight, etc. Hence divers should be initially classified to diving using semi-closed circuit rebreathers with regard to the fulfilment of the assumed individual parameters θ when designing the device and diving technology.

Individual parameters of divers θ change with the age and the degree of his/her preparation/training. Annual medical screening does not focus on these changes. Its task is to check the general state of health and not the level of training or fulfilment of individual parameters θ being the basis for the safe use of diving apparatuses. Therefore, one-time certification to dive with special diving devices may no longer be justified as divers age, or if their training is not kept up to date[86]. It seems good practice to check the essential for safety individual parameters of a diver θ during each training course to obtain higher diving qualifications.

In the process of diving safety analysis in the Navy of the Republic of Poland, it is crucial to properly prepare the dive in terms of the diver's condition, efficiency and decompression, because the individual parameters of a diver θ sometimes undergo significant fluctuations as a result of adaptation training or its discontinuation. Control of individual parameters of a diver θ is possible during mandatory training using hyperbaric exercise simulators, preferably hyperbaric swimming simulators[87], as part of the prevention of potentially dangerous situations.

The level of diving safety is closely related to the risks posed by the equipment and technology used[88].

The presented project focuses on elements of the diver's equipment, i.e. the SCR CRABE SCUBA rebreather and the resulting risk of decompression sickness (DCS) and central form of oxygen toxicity (CNSyn), in the tactical context of MCM mine-warfare. Important elements of the diving equipment, include XBS[89], diving suits[90], gas analysers[91], decompression meters, etc.

TACTICAL CONTEXT

In military diving, the use of diving equipment as structural components of a system ensuring the implementation of processes resulting from the adoption of specific tactics[92] plays a dominant role. In the understanding of the tasks of the described project, dives constitute an element of the system aimed at ensuring the protection of our own forces and public safety, which can be divided into three subsystems: MCM[93], EOD[94], and IEDD[95].

MCM activities are processes implemented in the mine-warfare System. The elements of the mine-warfare system are specialised vessels, traditionally divided into two groups: mine sweepers and mine hunters, but nowadays this division has become blurred and it can be assumed that in modern navies there is a single class of vessels used in this respect, i.e. MCMV[96]. The first of these are the traditional minesweepers, which, when passing over the minefield, drag the trawls that simulate the physical fields of ships, forcing mine explosions or undercutting an anchor mine and shooting it on the surface. The second type of vessel has developed into an MCMV and is a comprehensively equipped vessel for the implementation of mine searches and neutralisation processes, in particular intelligent mines. Typically, MCMVs are equipped with autonomous AUVs[97]/UUVs[98] for reconnaissance in order to collect on a digital map potential targets that can be neutralised by other autonomous AUVs or ROUVs[99]. Such vehicles can carry special explosives for neutralisation of suspicious objects, 'bombard' them with the use of dedicated explosives detonated remotely after the vehicle has entered a safe area, or with a self-propelled explosive charge.

Most commonly, a ship is also equipped with an ROUV fitted with various sensors to scan the basin ahead of the ship[100] and a towed system equipped with similar sensors for scanning the seabed. Such a vessel may be equipped with an intelligent trawl system simulating physical fields of different classes of ships. It is most often towed by an MCMV-based surface unmanned ASV[101]. The ship is a part of the network-centric[102] system of larger anti-mine forces[103]. Such units usually have divers prepared to carry out rescue operations[104] and serve as one of the elements of mitigating the threat from sea mines.

It is possible for MCM divers to perform dives from small vessels operating from the shore or carried by ships[105]. Their tasks may include reconnaissance, less often liquidation or partition of defence infrastructure of hydrotechnical objects or bank reinforcement[106].

In the part concerning MCM activities, the presented project focuses on rescue operations of MCM equipment, neutralisation of intelligent mines and the

blinding of electronic defence infrastructure of maritime objects.

The EOD activities focus on the elimination of dangerous explosives, in the form of undetonated military explosives UXO[107] as remains from: wars, bases, military exercises, etc. Owing to the related risk, these activities are treated as combat activities carried out in conditions of peace[108]. An important variation of these activities are IED operations focused on counteracting UXO not recognised as typical military equipment. At least theoretically, EOD operations pose less of a threat, because the way of proceeding results from catalogued algorithms of handling UOX of military origin, which typically have the possibility of deactivation when set to being irremovable, or the defence system of an intelligent object.

Unfortunately, even relatively primitive IEDs can be irremovable otherwise than by their controlled detonation, and the only countermeasure to reduce the impact is to rapidly divert the shock wave in a different direction[109] or to use protective screens[110]. In some cases it is possible to use jamming[111] against the electronic devices applied, however often these are relatively primitive electrical devices, which can be deactivated only mechanically, for example by shooting them with various kinds of bullets[112] from a cannon or with a cumulative EFP charge[113], burning with a thermite charge, melting of an explosive material, etc. The project by its nature is connected with the MCM and EOD activities, omitting the IED activities, as the IED is closely related to the parameters of physical fields generated by diving equipment and is not strictly related to the diving technology, although the processes of flushing the breathing space of the device are extremely important from the point of view of emitting noise into the body of water.

From a tactical point of view, risk analysis is aimed at accepting levels of threat other than the levels resulting from the risk analysis of diving operations. This is obvious as both approaches relate to different objectives. However, the tactical planning of diving operations must also take into account the conditions of the diving technology. For example, for a hypothetical scenario of an operation to land members of the armed forces at a specific location. the analysis of the risk of a hidden reconnaissance operation and the possible preparation of separation of underwater minefields by divers, from a tactical point of view, is aimed at determining the probability of effective performance of the task at the assumed level of confidence[114].

The protection of navigable waterways should be implemented safely and quickly. It is not always possible for MCMV units to be called in to deal with drifting mines observed by vessels which themselves are not equipped to deal with the task . In this case, typical drifting mines may be cleared by VSW divers/swimmers[115], who, operating from helicopters, and may be dropped into the water and place a remotely activated charge in the proximity of the drifting mine[116] or on it. Intelligent mine countermeasures on a navigable route cannot always be achieved by underwater vehicles or self-propelled charges on account of the region or the expected operation of the mine[117]. Since vehicles are more easily and more likely to be detected by the sensors of such mines, the use of divers remains, as they have a high possibility of masking themselves against the background of normal physical fields occurring in the water. A diver can precisely set a small, non-electrically ignited cumulative charge, cross-wire a mine until it is detonated by a self-propelled charge or prepare it for towing.

Underwater IED activities are practically always carried out by VSW swimmers or divers.

Counteracting terrorist attacks or actions in asymmetric conflict where suicide divers are being used is based on the use of unmanned equipment, manned equipment, SRT diving operations, etc. Knowledge of the capabilities of divers in such cases is extremely important, not only to estimate the risk to their own forces, but also the potential of terrorist/suicide divers.

During the implementation of the project data for tactical risk analysis for typical scenarios of underwater operations will be compiled in conjunction with the risk of decompression sickness (DCS) or central oxygen toxicity (CNSyn).

RESEARCH CONTEXT

At the very beginning of work on decompression systems for diving devices in Poland[118] it was noted that domestic progress is possible only through seeking deterministic models[119]. Consistent adherence to this assumption by three generations of researchers has led to the development of reliable and effective, though arduous, methodology[120].

In the applied research approach, the methods of predicting the behaviour of the ergonomic diver-rebreather system were divided into a number of interrelated models[121] – fig. 1. On the basis of the validation studies conducted to date, it seems that the analytical breakdown into partial models does not cause the generation of significant errors in their synthesis into a holistic model and their use according to the holistic approach.

Ventilation modelling by means of differential equations has been known for centuries. These are relatively simple equations that can be solved by mathematical analysis methods.

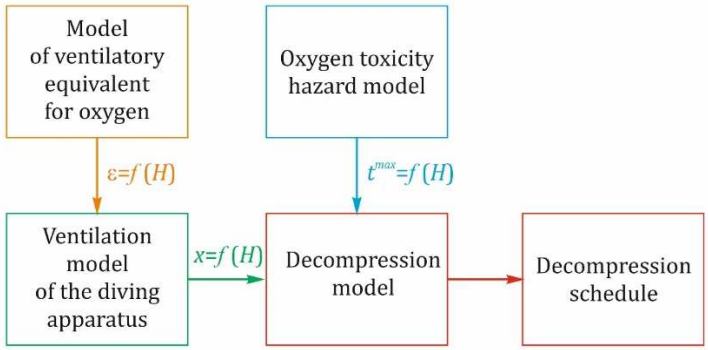


Fig. 1. Model sequence.

However, their usefulness until recently was questioned on the grounds that some parameters of these models could not be determined with sufficient accuracy[122]. Therefore, ventilation engineering is based on semi-empirical models derived from the approximate solution of the differential equation by means of dimensional analysis methods.

The barriers related to the use of a deterministic approach to the ventilation process were first overcome about 15 years ago. This made it possible to master the modelling of deterministic ventilation of a submarine, a hyperbaric chamber or a mining pit [14]. The use of these achievements in industrial and sanitary engineering could lead to a change in the approach to ventilation problems.

Earlier studies on ventilation of a semi-closed-circuit rebreather with continuous dosing of the breathing mix were successfully completed about 20 years ago [13]. However, such devices have been withdrawn from national use.

In the current approach to modelling a diving system using the SCR CRABE SCUBA, the initially holistic approach has been replaced by an analytical one. The basis for the planning of decompression schedules is based on several models shown in fig. 1:

- modifications in the breathing module[123] ε in the function of depth H: $\varepsilon = f(H)$,
- modifications in the composition of the breathing mix inhaled by the diver $(x_1..x_j, x_i) = f(H, \varepsilon, \varepsilon_k, x_w, t)$ depending on: depth H, breathing module ε, design parameters for a semi-closed breathing space of a rebreather ε_k, premix composition x_w and time t,
- changes in the hazard of central oxygen toxicity CNSyn depending on oxygen partial pressure p_i and exposure time t,
- designing decompression[124] as a function of hyperbaric exposure time t and pressure H, taking into account the influence of interfering factors such as temperature T, the influence of previous exposures on decompression, increased risk of central oxygen toxicity CNSyn, additional workload W, immersion and ascent sequence, transport to the place of immersion, stress load before and after diving, etc.

The function $\varepsilon = f(H)$ of changes in the breathing module[125] ε depending on the depth H is not crucial for the reliability[126] of determining the values of stable oxygen content x_s from the ventilation model. It has become significant because unexpectedly the other models shown in fig. 1 are determined with much greater reliability. When searching for solutions for the differential ventilation model of a rebreather containing a system of bags placed one in the other $\frac{\partial}{\partial t}(x_1..x_j, x_i) = f(H, \varepsilon, \varepsilon_k, x_w, t)$ the breathing module ε began to play a key role[127]. This made it necessary to conduct research on the reliable determination of the dependence of the breathing module $\varepsilon = f(H)$ on depth H.

The studies of the breathing module ε are described in the available literature with respect to atmospheric pressure, as they constitute an important indicator of athletes' training and form the basis for many studies concerning effort medicine or work standardisation [15]. The hitherto uncritical transposition of values for normobaric conditions into hyperbaric studies was a barrier to an adequate development of diving systems. The results of studies concerning the breathing module ε in specific hyperbaric situations can be found in rare specialist publications [5-6]. However, the application of these values is still associated with a decrease in the required accuracy and precision of ventilation modelling. Determination of the relationship $\varepsilon = f(H)$ regarding changes in the respiratory module ε as a function of depth H for predefined conditions was performed by conducting experimental exposures in simulated conditions on a representative group of experimental divers[128].

The ventilation model allows to determine the stable oxygen content as a function of depth: $x_s = f(H)|x_s(H, W) \equiv x_i = idem$, environmental parameters and effort. After considering the fluctuations encountered Δx_s in a stable oxygen content x_s, for a predefined depth H and workload W, the model constitutes a contribution to decompression modelling – fig. 1.

In semi-closed circuit rebreathers SCR supplied with premix, there is a relative decrease in oxygen content[129] from the concentration in the premix x_w to a stable value[130] x_s. This phenomenon is caused by obtaining the equilibrium condition when the regenerated mixture is mixed with the fresh one. The dynamics of this process can be modelled similarly to other ventilation processes [14]. Based on previous longstanding studies, it can be concluded that the ventilation process of the SCR CRABE SCUBA rebreather can be described in sufficient detail based on the ideal gas law. The differential equation built on the basis of the molar balance can be accurately calculated. Such an approach is not widely used owing to the difficulties encountered in establishing certain parameters for this equation. Through many years of research on the process of ventilation of submarines,

hyperbaric chambers, mining pits, etc., it was possible to propose a reliable approach to this issue, hence the modelling was based on a fully deterministic, algebraic analytical model.

Research into the process of rebreather ventilation without human participation is carried out using a station of accumulated simulators of: metabolic oxygen consumption $\dot{v}$, respiratory action $\dot{V}_E$ and depth H. The simulator is, in many respects, an original solution on a world scale created as a result of many years of own research. It is distinguished by the fact that a liquid medium is used to simulate oxygen consumption $\dot{v}$, and not a gaseous one as in other similar technical solutions in the world [16]. Because of this, adding it negligibly disturbs the volume of gases in the ventilated space. The simulator set-up features an extremely short pathway between the pump simulating lung ventilation $\dot{V}_E$ and the tested respiratory system, which does not cause compression and expansion of the breathing mix in the line inducing respiratory action.

Concurrently, research is conducted in simulated hyperbaric conditions with the participation of experimental divers. Based on the results of these studies, the reliability of the applied modelling of the ventilation and gas exchange process in the ergonomic diver-rebreather system is determined. Studies conducted without the participation of experimental divers give an answer on the credibility of the applied mathematical model in relation to the processes taking place in the real object, i.e. the rebreather. Research with experimental divers allows us to determine the decrease in the reliability of the mathematical model in the course of rebreather ventilation when accompanied by a disturbance associated with the biometric diversity[131] of divers HF[132], marked here as θ.

While oxygen is needed to maintain haemostasis in humans, it is also a carcinogenic factor. Theories exist that postulate that its effects are the main cause of ageing of aerobic organisms[133]. In hyperbaric conditions, it is more dangerous, revealing some forms of toxicity not found in everyday life. Under hyperbaric conditions, oxygen exhibits pulmonary[134], central[135] and somatic toxicity[136] [17-20]. The most serious form of oxygen toxicity in short-term military dives is central toxicity CNSyn.

Experiments with central oxygen toxicity CNSyn often revealed less specific symptoms, such as anxiety, paleness of the face, tremor of the lips and eyelids, nausea, cramps, confusion, lack of coordination, visual and auditory hallucinations, narrowed vision or speech disorders. These symptoms rarely precede the seizure. The onset of generalised convulsions is sudden. The seizure starts with a tonic phase, usually lasting 30 seconds, during which the diver loses consciousness and the respiratory function stops. This is followed by a clonic phase with uncoordinated movements of the whole body. The duration of the whole attack is usually about 2 minutes. If the poisoning has occurred in the water, the safety diver should try to wait until at least part of the consciousness and respiratory action have returned, a period of apnoea of up to 3 minutes can be allowed.

An ascent of a diver without restoring respiratory action may cause pulmonary barotrauma, as oxygen toxicity and loss of respiratory action are usually accompanied by laryngeal clenching. Severe forms of central oxygen toxicity CNSyn are fatal. There are many empirical models in the world to predict the risk of this form of oxygen toxicity CNSyn [21]. The project is based on the widest published systematic research on modelling the risk of central oxygen toxicity CNSyn[137] relying on mathematical survival analysis[138] [22-23]. The model was adjusted on the basis of the results of studies conducted by the British during World War II [24-25] and their continuation by the Americans until the late 1970s [26]. Our own research on the adequacy of such an approach to central oxygen toxicity CNSyn modelling was completed with the validation of the model established by the US Navy [4].

The estimation of the level of relaxation[139] following oxygen exposures is most commonly performed using the empirical model[140] proposed by the Oceanic and Atmospheric Administration [27].

The estimation of safe decompression schedules was based on the abandoned[141] $ZH - L_{12}$ model developed by Bühlmann for the Swiss army [28]. The model takes into account military conditions, such as: the special selection of a group of divers, keeping divers in the condition to undergo strenuous decompression, increased level of approved threat, etc. It can be assumed to be extremely safe. The model was validated during previous studies[29-30].

Decompression planning must be based on predicted scenarios for diving operations, safety measures applied[142], pre- and post-diving rest conditions, transport conditions, etc. The assessment of these parameters can be carried out through experimental dives under simulated conditions, which allows the determination of the permitted ranges of selected exposure parameters. Validation of the approach, as in previous stages of the study, can be achieved by statistical means using sequential analysis [31-32].

The deterministic models of ventilation of the semi-closed respiratory space of the SCR CRABE SCUBA rebreather and decompression presented in Fig. 1, as well as the statistical model of the risk of oxygen toxicity CNSyn were established with such reliability that the empirical model $\varepsilon = f(H)_\theta$ of a change in the respiratory module ε along with depth H for a selected population of experimental divers θ as a parameter, became the modelling element with the greatest effect on the safety of conducting a hyperbaric exposure. Selected population of divers θ was a standard population admitted to military diving in the Polish Navy. Additionally, population θ should undergo the test for deviations from the function $\varepsilon = f(H)_\theta$ describing changes[143] in the respiratory module ε with depth H as well as oxygen tolerance test TTT [32]. A negative result of the oxygen tolerance test is a premise to plan diving operations only with a lower risk of central oxygen toxicity CNSyn and to take precautions when planning the treatment process using $oxy - TT$ procedures[144] [32]. In turn, deviations from the established function $\varepsilon = f(H)_\theta$, mean that for safety reasons, the diver should have a differently designed decompression. Negative results of these tests tend to disqualify the diver from diving training with the use of the SCR CRABE SCUBA, for formal organisational reasons[145].

The ability to continuously improve the precision of decompression planning involves constant improvement of the empirical model $\varepsilon = f(H)_\theta$ for a change in the respiratory module ε together with depth H. Each dive providing reliable data[146] on its course enhances the database to be used in the inference on the precision of determining the function $\varepsilon = f(H)$ and can be used as a guideline to change the decompression schedule.

Operational dives cannot provide reliable data for such inference, but training and simulation exercises give such a possibility.

The inference regarding increasing the risk is connected with the diagnosis of deviations from the empirical model $\varepsilon = f(H)_\theta$ of changes in the breathing module ε with depth H. Data collected during training and practice in the diving simulator help to identify divers for whom the decompression procedure may be potentially dangerous. Diver testing on a diving simulator may be used to eliminate DCS hazards. If the results of the research show no deviations from the model $\varepsilon = f(H)_\theta$ and an increased risk of symptoms of decompression sickness DCS is observed, other causes should be sought, for example, deviations from the technology[147] of conducting underwater works or casuistic reasons[148]. Monitoring of deviations from the empirical model $\varepsilon = f(H)_\theta$ of a change in the respiratory module ε with depth H is a potential tool of work for an officer responsible for the safety of diving in the Polish Navy.

PROJECT CONTEXT

A scientific project is a process that takes place in a system that has the structure allowing its implementation[149], for which an analysis of internal and external contexts should be carried out.

The objective of the project was the operational need to implement a domestic[150] diving technology using an independent semi-closed-circuit SCR CRABE SCUBA rebreather as a subprocess of mine countermeasures operations MCM. The analysis of the project context was carried out using the SWOT method[151]. A separate problem will be the analysis of the context of mine warfare for dives using the SCR CRABE SCUBA.

The results of the generation of expected strengths and weaknesses as well as threats and opportunities are presented in tab. 2. Strengths S include everything that is an asset, advantage or value of the analysed system, i.e. the established research project. Weaknesses W comprise all that constitutes a weakness, barrier or disadvantage of the analysed system. Opportunities O encompass all that creates an opportunity for the analysed system to make a positive change. Threats T include everything that creates a danger of an adverse change for the analysed system.

A strength of the project context is the existing research base. Its beginnings date back to the times of the Council for Mutual Economic Assistance, which made the decision on Poland's specialisation in the production of hyperbaric systems ensuring the possibility of conducting long-standing underwater works to a depth of 200 mH2O. The main pressure facilities were to be manufactured by the Szczecin Shipyard. The coordination of the research programme for the shipyard was entrusted to the Gdańsk University of Technology. The Polish Naval Academy (AMW), on the other hand, was to be a supplier of life saving systems. In order to ensure financing of such extensive works, Central Research and Development Projects (CPBR) were established. It was soon realised that an important element ensuring the success of the undertaking would be the delivery and acceptance tests entailing the need to conduct saturation dives. At that time, saturation diving technologies were considered strategic and were not rendered available to the public. It was decided to entrust the task of developing such a technology to the Military Medical Academy WAM[152] which did not have its own technical facilities but cooperated with the Polish Naval Academy.

It was also realised that the possibility of hiring a professional team of divers from outside Poland is related to such a large economic barrier that it was decided to enhance the activities by establishing a separate CPBR division[153] in which such teams would be trained. This task was entrusted to the WAM-AMW team.

The research carried out at that time and later implementations of the technology contributed to the establishment of a knowledge base for further work in the field of widely understood diving technologies, which were continued also through international cooperation.

Tab. 2

Main strengths S, weaknesses W, opportunities O and threats T for internal and external conditions for the implementation of the national diving technology with the use of an independent semi-closed circuit SCR CRABE SCUBA rebreather.

S	1	research base in place
	2	scientific and research potential
	3	gained experience
W	1	insufficient military service base
	2	inefficient supply system
	3	possibilities of decompression and treatment tables
O	1	enhancement of the required NATO operational capabilities
	2	development of a systemic approach to the planning of diving operations
	3	plan to modernise the Armed Forces
T	1	expected long implementation period
	2	need for significant financial resources
	3	difficulties in maintaining the sustainability of the project results
S - Strengths: all that is an asset, an advantage, a value the analysed system		
W - Weaknesses: all that constitutes a weakness, barrier or disadvantage of the analysed system		
O - Opportunities: all that creates an opportunity for the analysed system to make a positive change		
T - Threats: all that creates a danger of an adverse change for the analysed system		

The acquired knowledge was used to maintain the continuous presence of the AMW service department rendering underwater work services for Polish drilling platforms and to implement various diving technologies. The technical base created at that time was repeatedly modernised and nowadays it is a cutting edge facility. Over thirty years of experience allows us to assume that the project has a chance to expand the boundaries of knowledge in the field of hyperbaric technologies.

Weaknesses of the project include insufficient repair facilities for the diving gear acquired from the Armed Forces modernisation plan, and an inefficient spare parts supply system.

The most important weakness resulting from the external context is the fact that the supplier provides decompression tables that do not meet all our requirements. The regulations and well-established tradition in the Polish Navy requires that the diving technology used ensures, inter alia, the following:

- in the event of a failure in the oxygen supply, the possibility of completing the decompression using the mixture used during the stay on the bottom,
- in the event of a deteriorating seas state and increasing wave activity, ending the decompression at the stop at 6 mH_2O.

The supplied diving technology did not offer any additional recommendations for the treatment of serious cases of decompression sickness resulting from a rapid ascent of a diver or omission of a significant part of decompression stops[154].

Implementation of independent dives with the use of SCR CRABE SCUBA rebreather gives Poland a chance to meet NATO requirements and increases the possibilities of interoperability of the Polish Navy.

The key cognitive opportunity resulting from the project is the potential to fill a knowledge gap and meet the tactical requirements or develop diving technologies. The acquired knowledge will enable effective actions to be taken in the future. Unfortunately, it should be expected that expensive and long-lasting research should be undertaken at the initial stage of work. With support from the Armed Forces modernisation plan, the chances for the successful completion of the project are very good.

The main challenges are the waiting time for the first results of the project, which always seems too long to the decision-makers, and the high financial resources needed to cover the scientific research. However, the biggest problem is the long-term preservation of the project's results. This problem concerns not only Poland, but almost all partners of the Alliance, because of the generation gap among specialists in hyperbaric technology. In fact, there is a kind of backwardness, which is visible in the repeated solving of the same problems, sometimes with worse results in comparison to the original results.

In the phase of association strength analysis, for the generated strengths S and weaknesses W, opportunities O, and threats T for internal and external conditions related to the implementation of the project scope, an analysis was carried out using a three-grade scale:

- 0 no association,
- 1 weak association,
- 2 strong association.

The results are contained in tab. 3.

Tab. 3

Results of the analysis of the strength of association between strengths S and weaknesses W, opportunities O and T threats for internal and external conditions related to the implementation of a domestic diving technology with the use of an independent semi-closed circuit SCR CRABE SCUBA rebreather.

		O.Opportunities			T.Threats		
		1	2	3	1	2	3
S. Strengths	1			2	1	1	2
	2			2	2	2	2
	3	2		2	2	2	1
W. Weaknesses	1	2		2	2	2	
	2	2	1		2	1	
	3	2	2	2	2	2	

0-no association oddziaływania

1-weak association oddziaływania

2-strong association

Tab. 4

Results of analysis of implications for strong associations between strengths S and weaknesses W, opportunities O and threats T for internal and external conditions for the implementation of a domestic diving technology using an independent semi-closed circuit SCR CRABE SCUBA rebreather

		O.Opportunities			T.Threats			O.Opportunities			T.Threats		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
S.Strengths	1			Y			Y			Y			Y
	2			Y	Y	Y				Y		Y	Y
	3	Y		Y	Y	Y				Y			
W.Weaknesses strony	1	Y			Y					Y	Y	Y	
	2	Y			Y						Y		
	3	Y							Y		Y	Y	

• Does a given strength allow to use a given opportunity?	• Does a given opportunity contribute to a given strength?
• Does a given strength mitigate a given threat?	• Does a given opportunity allow to mitigate a given weakness?
• Does a given weakness limit the possibility of taking advantage of a given opportunity?	• Does a given threat weaken a given strength?
• Does a given weakness increase the risk associated with a given threat?	• Does a given threat expose a given weakness?

Y—YES

The numbering of generated strengths S, weaknesses W, opportunities O and threats T for internal and external conditions concerning the project implementation is identical as in tab. 2 and tab. 3.

The analysis of implications of the identified strong associations for the left side of tab. 4 was conducted by answering the following questions:

- Does a given strength allow to use a given opportunity?
- Does a given strength mitigate a given threat?
- Does a given weakness limit the possibility of taking advantage of a given opportunity?
- Does a given weakness increase the risk associated with a given threat?

Whereas for the right side of tab. 4 the analysis was carried out by providing answers to the questions:

- Does a given opportunity contribute to a given strength?
- Does a given opportunity allow to mitigate a given weakness?
- Does a given threat weaken a given strength?
- Does a given threat expose a given weakness?

The results of the implication analysis summarised in tab. 4 have the same numbering of strengths S, weaknesses W, opportunities O and threats T as in tab. 2 and tab. 3.

Only strong associations were described, for which deterministic relations[155] were revealed in the form of a positive answer to the questions presented in tab. 4.

Will the existing scientific and research base allow to increase the required operational capabilities within NATO?

After the modernisation, the existing scientific and research base will enable performing tests on measurement stations with the participation of

experimental divers within the scope of the necessary technologies covering the required operational scenarios. The basic scope of the modernisation of the hyperbaric complex will be the restoration of the cooling capacity of the water in the pool. Modernisation is also required for the system of visual monitoring, diving parameters and recording of conversations. The dive testing station requires building a new metabolic simulator and incorporating it into the system of breathing and hyperbaric simulators.

The existing hyperbaric base also serves as a trainer for MCM divers and is used in the training of MCM divers for higher diving levels.

Will the existing scientific and research capacity allow to increase the required operational capabilities within NATO?

It seems that the Naval Academy still has sufficient human resources to carry out the necessary research. However, medical security is provided by a physician employed under a civil-law contract. The experimental divers are also contracted under civil-law contracts with military units. Therefore, most of the project activities must be carried out outside of business hours. Will the experience gained be sufficient to increase the required operational capabilities within NATO?

It seems that the experience gained in the works on the development of new diving technologies will allow the implementation of the current project. It is expected that new knowledge will be acquired, which will enable a significant increase in work efficiency. Such hopes arise from the development of new mathematical models for the main processes for an ergonomic diver-rebreather system. In particular, an adequate model of respiratory space ventilation would contribute to a significant progression in the design of diving technology and system environment.

Deterministic models should be sought wherever possible while probabilistic models should be used only in the process of validation of the developed technologies.

Will the existing scientific and research base allow to reduce the risk related to difficulties in maintaining the sustainability of project results?

The scientific and research base is an excellent tool for conducting research on new diving technologies. However, in the absence of specialists who would like to undertake research in this area on their own, it will not be possible to maintain the sustainability of the project's results. Similarly as in other world centres, as the scientists working there leave, the competences of these institutions are slowly declining.

Will the existing scientific and research potential allow to mitigate the risk related to the expected long-term implementation of the project?

The impatience of ordering parties is the cause of failure of many projects. Fatal accidents in particular reduce the patience shown to research teams. It seems that the Polish Navy will be able to maintain the necessary patience due to unsatisfactory progress in research into diving technologies for SCR CRABE SCUBA and SCR IS-Mix SCUBA.

At the moment, it appears that the project team has experience in developing new diving technologies. And the procedures and equipment used are at a good world-class level. This does not guarantee that the risks associated with the expected long duration of the project will be eliminated, but it does provide hope that the project will be successful within the assumed time horizon.

Will the existing research potential reduce the risk related to the expected high expenditures on project implementation?

Unsatisfactory progress in SCR CRABE SCUBA and SCR IS-Mix SCUBA SCR technology research is undoubtedly associated with low budget and time constraints for project teams.

The project budget is typical for projects with an average level of funding. It includes elements of infrastructure modernisation, which is also used for training and practice. Hence, the level of financing did not raise any objections. In the conditions of economic stability of the country, project budgeting seems to be secured.

Will the experience gained be sufficient to mitigate the risks associated with the expected long duration of the project?

The accumulated knowledge base raises great hopes for bridging the knowledge gap in the modelling of ventilation of SCR semi-closed circuit rebreathers. In this area, the key task will be to re-build a metabolic simulator on a new simulation site consisting of a breathing and hyperbaric simulator. The experience gained with the previously used simulator suggests that the project is expected to bring significant progress in knowledge in the design of ergonomic diver-rebreather systems.

Will the experience gained allow to mitigate the risk related to the expected high expenditures on project implementation?

It can be reasonably hoped that during the project implementation a breakthrough will take place and the next knowledge gap will be filled allowing for more effective work on new diving technologies. However, such a scenario usually does not contribute to the reduction of costs, but results in the revaluation of the objectives towards a higher quality standard for the final solution.

If the scientific achievements of the project are significant, it is likely that a higher achievable quality standard will require additional financial support and an extension of the project duration.

Does the insufficient military base limit the possibilities for increasing the required operational capabilities within NATO?

Formally, the insufficient service base for SCR CRABE SCUBA diving equipment does not limit the possibilities to increase the required operational capabilities within NATO, but reduces combat readiness through too lengthy bureaucratic procedures, which can be shortened with goodwill. However, the operation of diving gear is largely based on external services, which have to be contracted under public procurement[156]. This model is not sufficiently efficient in a context where it is necessary to maintain constant, increased combat readiness.

Does the inefficient procurement system limit the possibilities for increasing the required operational capabilities within NATO?

According to the philosophy of conducting combat operations, an inefficient supply system for SCR CRABE SCUBA diving equipment eliminates the possibility of maintaining operational capability to conduct

underwater combat operations, including those within NATO.

Units dispatching mine patrols should have a separate fund to maintain constant combat readiness. Regardless of the needs, which will be planned on the basis of experience gained and implemented centrally, these units should have at their disposal repair workshops, systems for the production and authorisation of breathing mixes, the ability to promptly purchase gases, spare parts, etc.

Do the current possibilities of the decompression and treatment tables limit the possibilities for increasing the required operational capabilities within NATO?

The project focuses on decompression planning adapted to the operational scenarios implemented by MCM divers, for whom the possibilities of the tables used thus far have been limited in this respect.

In the case of independent deep water dives, it is important to take into account that a diver may make a rapid ascent. The experience of other NATO countries shows that standard procedures based on a set of tables proposed by the US Navy may not be sufficient. Securing such dives may require traditional treatment in saturation conditions. This requires changes in the designs of new decompression chambers planned within the KORMORAN II project, modernised hyperbaric facilities on the PIAST and LECH ships as well as SERCÓWKA kits.

Unfortunately, other NATO countries are not prepared to offer us sufficient support for medical actions, which is why this issue must be resolved with domestic efforts.

Does the insufficient military base increase the risk associated with the expected long duration of project implementation?

Insufficient military service base may cause the lack of operable rebreathers for testing and thus prolong the project implementation time.

Does an inefficient supply system increase the risks associated with the expected long duration of the project?

An inefficient supply system may cause the lack of spare parts for rebreathers and result in the lack of operable devices for testing and thus prolong the project implementation time.

The analysis of the right part of tab. 4 is complementary to the one conducted above and it is unlikely to reveal additional conditions resulting from the project context, hence it will not be presented in this paper.

RISK IN THE PROJECT

The initial risk analysis for project implementation was performed using the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) method [33]. A different approach will be required for the risk analysis of tactical use of MCM diving technology as an element of the mine warfare system[157].

Risk analysis, conducted with the FMEA method, is oriented on the capability to predict the occurrence of irregularities in the system or in the process taking place in the system, on the basis of expert knowledge and early development of methods of reaction to the predicted forms of risk materialisation as a threat or opportunity, regardless of the financial scale of the effect of this materialisation. Using the FMEA method, a potential risk may be ranked in terms of probability and technical scale of its impact at the time of its materialisation. The financial scale[158] of risk materialisation should be assessed in parallel to the technical analysis in order not to focus actions to minimise the financially insignificant effects of risk materialisation, while the more severe ones are left as residual. This method has also been successfully applied in other projects [34-35].

The FMEA methodology not only contributes to minimising the effects of risk materialisation, but also establishes a hierarchy of diagnosed, inherent types of risk and thus allows to determine the necessary level and directions of monitoring of threats and opportunities.

The analysis uses the notions of risk and threat. The differential of the function of risk from the moment t=0 to the moment t here defines the threat or opportunity to materialise the risk.

In the initial phase, eight residual possible project risks associated with six types of risk were diagnosed:

1. lack of a sufficient number of experimental divers,
2. lack of control over the hygiene of life of divers,
3. selection of an inadequate population of divers,
4. occurrence of a casuistic[159] case of decompression sickness DCS,
5. testing of technology in conditions deviating from the actual conditions,
6. inadequate performance of a rebreather.

Tab. 5

Diagnosed main risks in the project.

Zdiagnozowane podstawowe rodzaje ryzyka w projekcie.

Type of problem / problem situation	Risk materialisation effect	Impact intensity following risk materialisation	Probable cause of risk materialisation	Risk materialisation probability	Possibility of risk materialisation detection	Probability of detection of risk materialisation	*RPN*	Applied prevention of risk materialisation	Corrected *RPN*			
		I		*P*		*D*	*RPN=I×P×D*		*I*	*P*	*D*	*RPN*
Lack of a sufficient number of experimental divers	Lack of possibilities for technology validation	9	Administrative problems	8	full detection	5	**360**	minimalisation	9	3	4	**108**
Lack of control over life hygiene in divers	Potential accident	7	Concealment of problems	7	Medium detection possible	8	**392**	avoidance, reduction	7	4	4	**112**
Selection of an inadequate population of divers	Inadequate technology	7	Lack of screening	5	Medium detection possible	6	**210**	minimalisation	7	3	2	42
Occurrence of a casuistic case of decompression sickness	Discontinuation of research	9	Unforseeable circumstances	4	Medium detection possible	6	**216**	transfer, co-sharing	4	4	6	96
Testing of technology in conditions deviating from actual conditions	Inadequate technology	7	Limited control of water temperature	8	ideal detection	1	56	replacement	7	2	1	14
		7	Inaccurate external analyses	7	full detection	9	**441**	reduction	7	7	2	98
Inadequate performance of a rebreather	Potential accident	7	Failure to check the rebreather	4	full detection	6	**168**	avoidance	7	3	2	42
		7	Failure	6	ideal detection	1	42	accepance	7	6	1	42

Intensity of generated threat *I*	Probability of occurrence *P*	Probability of detection *D*
1:Nearly imperceptible	1: improbable	1: ideal detection D%@100%
2-3:Slight burden on the clinet	2-3: Very small probability	2-5: full detection (100%>D%^{3}99.7%)
4-6: Moderate impact	4-6: Small probability	6-8: possible medium detection (99.7%>D%^{3}98%)
7-8: Large impact	7-8: Moderate probability	9: not full detection (98%>D%^{3}90%)
9-10: Very large impact	9-10: High probability	10: no detection D%@0%

***RPN* (Risk Priority Number) – Critical value of relative risk priority number *RPN*>100**

Ad. 1 The intensity of the threat posed by the lack of a sufficient number of experimental divers is high and was determined at a relative level of I=8 in a ten-grade ordinal scale, as the effect of materialisation of this threat will be the inability to validate the proposed technology or validation will be burdened with systematic error. Because of mostly administrative barriers, the probability of the threat being created was estimated at a moderate level and in a relative ten-grade ordinal scale they were determined at P=8 with full detection capability. Therefore, the detection probability was estimated at 100%>D%≥99.7%, which corresponds to the relative value of D=5 in the ten-grade ordinal scale. The value of the relative number of risk in this case is at the level of RPN=320, exceeding the critical value $RPN_{kr} = 100$ by more than 3 times– tab. 5.

As a way of responding to the risk of a lack of an adequate number of experimental divers, which creates the risk of a lack of validation of the technology under development or of validation burdened by systematic error, it was decided to minimise this risk by creating financial incentives and by additionally deciding to conduct experiments outside the working hours of military divers[160].

This reduces the relative probability of materialisation of the risk of bureaucratic barriers to a very unlikely level, estimated at a relative level of P=3, and slightly increases the probability of detection, owing to the expected cooperation with divers, resulting in early notification of inability to participate in the study on a given date: D=4. This allows to reduce the value of the risk number to the level of RPN=108, which falls near the critical value.

To date, no significant problems with the lack of experimental divers have been observed, but the spare time of military divers remains limited, hence the threat does exist. Attempts have been made by the Steering Committee to encourage the owner to request unit commanders to assign divers to the project. This would reduce the likelihood of a threat to the unlikely level of P=4 and the possibility of detection to the level of full detection D=3. This would bring the relative number of risks down to the level of RPN=108, slightly above the critical level RPNkr=100, which is identical to the previous one, therefore this option is treated as an emergency option.

Ad.2 Lack of control over divers' life hygiene is a high risk for the project, assessed at I=7 level, because it creates a potential risk of a diving accident at the materialisation of this risk. Such a risk is connected with Ad.1, because the willingness to earn extra income combined with the reluctance to change the behaviour in order to increase the hygiene of life increases this risk. Therefore, the probability of risk materialisation was assessed as moderate, at the level of P=7, with a possible average probability of detection at the level of D=8. Lack of control over the life hygiene in divers causes a significant threat to the project at the risk priority number RPN=392. The response to the risk will be to avoid it and reduce it by using diagnostic equipment: a breathalyser and a blood lactic acid testing kit. This will reduce the estimated probability of risk materialisation to small amounting to P=4 and increase the probability of detection to full: D=4: This will reduce the estimated risk priority number to RPN=112, slightly above the critical value.

Ad. 3 The selection of an inadequate population of divers may be caused by the lack of adequate screenings, but most often results from the need to carry out the project with a limited number of experimental divers available. Hence, the risk is quite closely connected with Ad.1. The intensity of the threat is estimated at a high impact level of I=7. The probability of risk materialisation was assessed at a low level of P=5, with an average probability of detection at a level of D=6. Taken together, this generates the risk priority number of RPN=210, more than double the critical value. The response to the risk will be to minimise it by conducting thorough tests on divers during experiments. This will minimise the probability of risk materialisation to a very low P=3 and increase the probability of detection to full, i.e. D=2. This reduces the risk priority number to the negligibly small RPN=42. During the previous projects one of the divers was diagnosed as not meeting the requirements of the model of operation of the rebreather. It seems that in the future it will be necessary to use screening tests for divers belonging to the group eligible for training and diving with the use of SCR CRABE SCUBA.

The available population of military experimental divers is not entirely adequate because, in accordance with the applicable law, it is permissible to admit soldiers who are qualified as senior divers to work as experimental divers. The path to obtaining such qualifications is long, hence they are older individuals in the population of divers who will use the developed technology. One of the ways to maintain the adequacy of the approach used is to invalidate the unrealistic requirement to use the technology only by soldiers with privileges of senior mine divers.

Ad. 4 A casuistic case of decompression sickness DCS, or DCS with a rare course or incidence, can always disrupt the validation process. Some of the conditions conducive to the occurrence of a case-specific DCS are listed in the part discussing the physiological context[161]. Partial countermeasures include testing of blood acidification or the presence of alcohol in the exhaled air, control of divers' life hygiene, training, etc. However, bad psychological attitude, taking diet supplements, sleep disorders, etc., may be dissimulated, concealed or ignored by a diver and not diagnosed during a medical interview. The materialisation of such risks is particularly acute, as it can lead to the retention of studies for the time of a post-accident investigation. The intensity of the hazard has been estimated to be high and amount to I=7. The probability of risk materialisation is unlikely and reaches P=4. The probability of pre-diving detection can be estimated as average: D=6. The risk response strategy is to make divers aware of the risk and to transfer it and share it with the insurer, hence significant resources have been allocated for the insurance of experimental diving under civil liability insurance. This will reduce the risk impact intensity to a level of I=4. This in turn will reduce the risk priority number from RPN=216 to RPN=96, which is slightly below the critical value.

Because the occurrence of a casuistic case of decompression sickness DCS is always possible, protection against DCS symptoms in divers is provided by monitoring the free gas phase in venous vessels. The method used at the academy for years has proven to be extremely useful.

Ad.5 Checking the technology, in conditions different from the actual conditions, creates a high intensity of risk materialisation, assessed at I=7. Two cases of risk materialisation are probable.

With a limited possibility to modify the water

temperature, the probability of risk materialisation was assessed as average at P=8, with ideal detection D=1. The risk priority number in this case is below the critical value of RPN=56. The reaction to this risk is its conversion into an opportunity by building a water cooling system in the pool of the hyperbaric complex. In this case, the estimated probability of risk materialisation with later use of the technology decreases to a relative value of P=2 corresponding to a very unlikely occurrence. Thus, the risk priority number drops to a negligibly low level of RPN=14.

The second type of threat is associated with an excessive error in the determination of the content of oxygen and other gases in the premix[162]. It would seem to be a very unlikely occurrence, but such cases had been observed in previous projects, hence the probability has been estimated at a moderate level of P=7. Such errors arise even with a small deviation from the established SOP procedures[163], good diving practice GLP[164] or ergonomic incompatibility between an operator analyst–a measuring instrument. In routine tests, such a risk can often easily materialise. The probability of risk materialisation detection is not full D=9. This produces a high technical threat, as the risk priority number is more than four times the critical value of RPN=441. The strategy for responding to the risk is to reduce the risk through: separation of an experienced observer in whose presence the analyses will be performed, commissioning the analyses to two laboratories or performing additional checks in an external laboratory. This will increase the probability of detection to full D=2 and reduce the risk priority number to a value slightly below the critical value, i.e. RPN=98.

Deviations from the assumptions for earlier diving technologies with the use of Nx/Tx-SCR CRABE SCUBA were diagnosed, consisting in the expense of greater than expected effort during the phase of entering and leaving the water. Divers descend from on board the ship and not from a pontoon, undertaking strenuous effort while moving on the gangway. As a countermeasure, it is proposed that the level of technology readiness be raised from level VIII to level IX by the research team, thus taking steps towards continuation of the project while taking into account these conditions. The materialisation of such a risk is critical as it depletes the project of significant financial resources as well as the time spent on project implementation. Such accidents do happen, therefore it is worthwhile to use the Lessons Learned guidebook made available by the NATO Navies.

In the case of not yet fully tested SCR CRABE SCUBA, the risk of inadequate operation may be caused by two reasons: lack of a thorough check before diving or failure. In both cases, the materialisation of risk may lead to a diving accident, hence the intensity of the hazard impact has been assessed to be high, i.e. I=7. The probability of improper testing of the rebreather prior to diving was estimated at the level of P=5 and the probability of detection at the level of D=7 as a result of an occurrence of a case of improper preparation of the rebreather during the research owing to a deviation from SOP. These parameters generate the risk priority number at RPN=24. The strategy of reaction to risk will consist in its minimisation by permanent, qualified supervision. Therefore, an extended supervision team will be used to conduct experiments by qualified and experienced specialists from the Academy. This will allow to reduce the level of probability of materialisation of the risk of a potential diving accident to the level of P=4 and the probability of detection to D=3. The reaction to the risk caused a reduction in the risk priority number to the acceptable level of RPN=84.

An inadequate operation of the diving apparatus is always likely. Preventing this risk is based on cooperation with the manufacturer through an industrial partner in the scope of changes in the design of the device to prevent the occurrence of irregularities in operation and bilateral scientific cooperation with CEPHISMER Tulon in the field of monitoring of existing problems in the French Navy.

Based on the analysis of the experimental dives conducted to date, the probability of failure of the diving apparatus was estimated at a low level: P=6, whereas the probability of detecting a failure at the ideal detection level D=1. Hence the risk priority number is at the small level RPN=42. The response to the risk is its acceptance.

The presented analyses show that after applying the reaction to the analysed risks, the value of the risk priority number decreased. The intensity[165] for certain risks in the project has been slightly reduced. The residual risk is still high, so the project should be classified as potentially posing a high technical and medical risk.

SUMMARY

Due to specific military requirements, diving technologies should be knowledge-based as extensively as possible. The planned research cycle will be based on a country based approach favouring deterministic modelling of semi-closed systems as a part of the SCR CRABE SCUBA rebreather. The issues of respiratory ventilation of the SCR CRABE SCUBA with both a premix and oxygen are key issues for the project and are therefore the main focus of the research. The system was developed using a process-oriented approach and system engineering methods. Under national conditions, the validation of the accepted theories by methods of inference based on binominal distribution is not possible to implement, hence the inference is based on sequential analysis [23].

The project is related to the MCM diving technology realised in a wide range of depths, as an element of the mine-warfare system. The dives should be conducted from the surface to about 80 mH2O and to cover different depth ranges decompression will be performed with oxygen and various Nitrox mixtures to the depth of 50 mH2O, whereas at greater depths with helium-based mixtures[166]. In principle, decompression should be accelerated by the use of oxygen. The context of utilisation of diving technologies as elements of the minefighting system seems to be particularly important. The goal should be to ensure that the conservatism of technology poses a threat within the limits[167] (1;3)% of an occurrence of DCI, as estimated for an epidemiological risk. The project did not include any studies on the possibility of undertaking repeated or repetitive dives.

During the project implementation, attention will be paid to selected problems of divers' life and work hygiene and adaptation training. The developed SOP procedures resulting from previous works and regulations will be maintained and, if necessary, revised.

The task of the project is to develop technologies for point diving. This approach requires both the development of a diving technology taking into account the lack of performing of additional work by the diver, where the main problem is the risk of the occurrence of symptoms of central oxygen toxicity CNSyn, as well as

dives performed during emergency situations, posing a potential threat of developing symptoms of decompression sickness DCS.

The tradition cultivated in the Polish Navy has shown that the decompression system should be secured with a system enabling the decompression process to be carried out in difficult conditions. Said system should consist of hyperbaric procedures and contain the required technical and medical equipment to execute them, including procedures to evacuate the diver to a specialist hyperbaric facility or hospital. Elements of the system of securing the realisation of therapeutic processes may be borrowed or developed anew. The system of therapeutic recompression tables should provide for therapeutic procedures in the event of a diver's rapid ascent from significant depths, omitting decompression stations.

The use of diving apparatus with semi-closed circulation of the breathing mix and mixtures with increased oxygen content requires the development of a recruitment process for divers and maintaining them in proper condition. The risk of developing symptoms of decompression sickness and central oxygen toxicity is higher than for recreational divers.

An important parameter of a diving operation is the possibility of burdening the diver with work, which is connected with the process of ventilation of the breathing space of the device, as well as the process of decompression and the increasing risk of central oxygen toxicity.

Regardless of the time and depth of the transition to oxygen decompression, an effective procedure should be sought for the process of flushing the breathing space of the diving device with oxygen. The decompression acceleration algorithm will depend directly on its effectiveness. Of course, it is necessary to consider the possibility of switching from oxygen decompression to gas mixture decompression at any time.

The system for conducting underwater works may not provide the possibility of repetitive dives, but it should normalise the amount of time spent on rest required to conduct a second dive.

Predefining the algorithm for maintaining a constant, assumed composition of the breathing mix inhaled by the diver through the diving apparatus requires making assumptions about the individual parameters of the diver, which are not always met, hence divers should be examined in terms of compliance. The individual parameters of a diver change with the age of the diver and the degree of preparation/training. It appears good practice to check the key safety parameters of a diver at the time of each training course for higher diving qualifications.

In the process of diving safety analysis in the Navy of the Republic of Poland, it is crucial to properly prepare a diver in terms of fitness and efficiency, as well as for the decompression, because the individual parameters of a diver tend to fluctuate significantly as a result of adaptation training or its discontinuation. Control of individual parameters of a diver is possible during obligatory training sessions carried out with the use of hyperbaric simulators, preferably hyperbaric swimming simulators or simulators of underwater work[168], as part of the prevention of potentially dangerous situations.

CONCLUSIONS

The scientific approach is based on a thorough analysis of the processes taking place in the examined system in order to be able to forecast its future[169] with satisfactory reliability[170].

The project uses a process-based approach to developing the theory that provides the possibility to plan underwater activities. The reliable[171] deterministic model for the ergonomic man-machine system established in the project offers the possibility of prediction[172] of the required reliability. The described process of deterministic modelling by its nature enables continuous improvement of prediction precision and estimation of threat level, while diagnosing deviations from model repeatability or precision. This is important because, due to specific requirements, military diving technologies should be as knowledge-based as possible.

FINAL INFORMATION

This paper contains only an extract from the performed context analysis for the project, without the description of the project assumptions, selection and analysis of critical parameters CTQ[173] and the identification of the main research process, which constitutes the introduction to the base project implementation plan and communication procedure, which on the other hand are the basis for the preparation of the feasibility study of the project. As can be seen, the context analysis explaining the needs and conditions of the project implementation is quite extensive and complex, even for the project stakeholders. The decision to publish it was connected with providing answers to questions challenging the purpose of undertaking the project. Project documents were assessed on a multi-level basis by various institutions, including independent scientific experts. Opinions calling into question the legitimacy of a decision to launch a project undermine their authority. Most of the decision-makers are unknown to me, but as a project manager, it is my duty to protect the results of their work. I hope that the positions negating the decisions made resulted only from the lack of awareness of how deep and accurate the thought process underlying the decision was.

Information about the project is, in its nature, public information and all institutions and persons possessing knowledge about it are obliged to answer the questions asked. The prepared application for the project is a legally protected good in Poland, hence the best way to reveal it is a scientific publication by the author. Therefore, should there still be a need for further explanations, the only obstacle to further disclosure of the assumptions for the project is the approval of a magazine printing such extensive material.

REFERENCES

1. Abysmal Diving Inc. 2001. Advanced Dive Planning Software. [CD] 6595 Odell Place, Suite G. Boulder Colorado, 80301 : Abysmal Diving Inc., 2001. ABYSS-2000 v.2.30.17;
2. Bennett P.B., Elliott D.H. 1975. The physiology and medicine of diving. London : W.B. Saunders Company Ltd., 1975. ISBN 0-7020-0538-X;
3. Brubakk A.O., Neuman T.S. 2003. Bennett and Elliott's physiology and medicine of diving. brak miejsca : Saunders, 2003. ISBN 0-7020-2571-2;
4. Bühlmann A.A. 1984. Decompression-Decompression sickness. Berlin : Springer-Verlag, 1984. ISBN 3-540-13308-9; ISBN 0-387-13308-9;
5. Donald K. 1992. Oxygen and the diver. Harley Swan : The SPA Ltd., 1992. ISBN 1-85421-176-5;
6. Donald K.W. 1947. Oxygen poisoning in man part I. British Medical Journal. May 17, 1947, pp. 667-672;
7. Frånberg O. 2015. Oxygen content in semi-closed rebreathing apparatuses for underwater use: Measurements and modeling. Stockholm : School of Technology and Health, 2015. ISSN 1653-3836.
8. Gerth W.A. 2002. Overview of survival functions and methodoology . [aut. książki] Weathersby P.K. Gerth W.A. Survival analysis and maximum likelihood techniques as applied to physiological modeling. Kesington : Undersea and Hyperbaric Medical Society Inc., 2002;
9. Harabin A.L. 1993. Human central nervous system oxygen toxicity data from 1945 to 1986. Bethesda : Naval Medical Research Institute, 1993. NMRI 93-03; AD-A268-225;
10. Huggins K.E. 1992. The dynamics of decompression workbook. Ann Arbor : The University of Michigan, 1992.
11. Kłos I. i Kłos R. 2004. Polish Soda Lime in military applications. Oświęcim : Chemical Company DWORY S.A., 2004. ISBN 83-920272-0-5.
12. Kłos R. 2000. Rebreathers with breathing mix regeneration. Poznań : COOPgraf, 2000. ISBN 83-909187-2-2.
13. —. 2019. Designing of diving technologies – process approach. Polish Hyperbaric Research. 2019, Vol. 66, 1, pp. 7-24.
14. —. 2013. Risk diagnosis on the example of a technical university. Logistyka. November-December, 2013, 6, pp. CD1: 275-294.
15. —. 2014. Inherent unsaturation. The risk of central nervous system oxygen toxicity part 1. Polish Hyperbaric Research. 1, 2014, Vol. 46, DOI: HTTP://DX.DOI.ORG/10.13006/PHR, pp. 37 – 64.
16. —. 2015. Catalytic hydrogen combustion on a sumbarine. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2015. ISBN 978-83-938-322-3-1.
17. —. 2007. Modeling of ventilation processes of normo- and hyperbaric facilities. Gdynia : Akademia Marynarki Wojennej, 2007. Postdoctoral thesis. PL ISSN 0860-889X no. 160A.
18. —. 2011. Possibilities of decompression selection for CRABE diving apparatus - assumptions for standard and experimental dives. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2011. ISBN 978-83-924989-4-0.
19. —. 2012. Possibilities of adaptation of oxygen-nitrox exposures for AMPHORA type diving apparatus - assumptions for standard and experimental dives. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2012. ISBN 978-83-924989-8-8.
20. —. 2017. Pollutions of the hyperbaric breathing atmosphere. Scientific Journal of Polish Naval Academy. 2017, Vol. 208, DOI: 10.5604/0860889X.1237621, pp. 31-44.
21. —. 2018. Securing the hyperbaric treatment of decompression sickness in the Polish Navy. Polish Hyperbaric Research ISSN 1734-7009; e-ISSN 2084-0535. 2018, Vol. 65, 4, pp. 7-23. Polish-English Bilingual Publication.
22. —. 2014. Survival analysis. The risk of central oxygen toxicity part 3. Polish Hyperbaric Research. 3, 2014, Vol. 48, DOI: HTTP://DX.DOI.ORG/10.13006/PHR.48.3, pp. 33 – 48.
23. —. 2016. Trimix decompression system for CRABE diving apparatusGdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2016. ISBN 978-83-938322-5-5.
24. —. 2013. Oxygen tolerance test. Polish Hyperbaric Research. 2013, Vol. 45, 4, pp. 69-78.
25. —. 2014. The hazard of central oxygen toxicity occurrence. The risk of central oxygen toxicity part 4. Polish Hyperbaric Research. 4, 2014, Vol. 49, DOI: HTTP://DX.DOI.ORG/10.13006/PHR.49.2, pp. 19 – 31.
26. —. 2014. The he pathophysiology related to the toxic effect of oxygen. the hazard of central oxygen toxicity part 2. Polish Hyperbaric Research. 2014, Vol. 47, HTTP://DX.DOI.ORG/10.13006/PHR.47.2, pp. 15-34.
27. —. 2007. The use of statistical methods in diving technique - Skrypt. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2007. ISBN 978-83-924989-26.
28. Kłos, R. 2009. Soda lime in military applications. Gdynia : no name, 2009. ISBN 978−83−924989−5−7.
29. Lambertsen C.J. 1986. Studies in isobaric counterdiffusion . Philadelphia : Institute for Environmental Medicine , 1986.
30. NOAA. 2017. NOAA diving manual - diving for science and technology. [ed.] Administration National Oceanic and Atmospheric. VI. Flagstaff : Best Publishing Co., 2017. ISBN 9781930536883.
31. PN-EN 60812:2009. 2009. Failure modes and effects analysis techniques (FMEA). Warsaw : Polski Komitet Normalizacyjny, 2009. ICS 03.120.01; 03.120.30; 21.020.
32. PN-EN-14143. 2005. Diving equipment. Self-contained closed-circuit diving apparatuses. Warsaw : Polski Komitet Normalizacyjny, 2005. ICS 13.340.30; 97.220.40.
33. Predictive studies IV. 1978. Work capability and physiological effects in He-O2 excursions to pressures of 400-800-1200-1600 fsw. Philadelphia : Institute for Environmental Medicine University of Pennsylvania, 1978. Report 78-1.
34. Report of proceedings Technical Symposium on The human factor in North Sea operational diving:. Proceedings Technical Symposium on The human factor in North Sea. 4-5 Nov1976. Heathrow : Hotel London, 4-5 Nov1976.
35. Shykoff B. 2007. Performance of various models in predicting vital capacity changes caused by breathing high oxygen partial pressures. Panama City : Navy Experimental Diving Unit, 2007. NEDU Report TR 07-13.
36. von Ahsen A. 2008. Cost-oriented failure mode and effects analysis. International Journal of Quality & Reliability Management 25: 2008 . 2008, Tom 25, DOI: 10.1108/02656710810873871, pp. 466-476.
37. Wald A. 1947. Sequential Analysis. New York : Jon Willey & Sons, Inc., 1947.

dr hab. inż. Ryszard Kłos, prof. nadzw.
AMW Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte
Zakład Technologii Prac Podwodnych
81 – 103 Gdynia 3
ul. Śmidowicza 69
Tel: +58 626 27 46

ORCID identifier No: 0000-0002-4050-3978

[1] methodology is a collection of principles concerning the performance of selected processes,
[2] Semi-Closed Rebreather Self-Contained Underwater Breathing Apparatus,
[3] technology is understood here as system optimisation for a given process,
[4] unless requests are made for their more precise interpretation,
[5] resulting from tactics,

[6] by way of various analyses, including studies of feasibility, competitiveness or risk analysis,
[7] system where more than the necessary elements have been applied due to functional reasons for the purpose of increasing its reliability,
[8] although it does not have to happen,
[9] Mine CounterMeasure,
[10] i.e. with little risk of an occurrence of even mild symptoms of DCS (DeCompression Sickness),
[11] slower for the decompression process,
[12] polish literature refers to such a procedure as extended decompression,
[13] conservatism will amount to 100% for the gradient equal to 30% of the maximum saturation value and 0% for 70% of the value of this gradient,
[14] Decompression Illness, as a term broader than DCS, for instance by including CNSyn (Central Nervous Syndrome),
[15] improving the mobility of disabled persons,
[16] enabling people with disabilities to participate in life, social and sporting activities, at a level similar to that of others with similar disabilities; for example, diving for people lacking limbs or diabetics' diving clubs,
[17] for example, failure of a hoist, winch, underwater vehicle, explosion, displacement of a wreck or its component, etc.,
[18] this situation occurs when a diver is rescued by their safety diver during any type of diving,
[19] Explosive Ordinance Disposal,
[20] Special Response Team,
[21] this applies to operations in peaceful conditions in the fight against terrorism, but when taking asymmetric actions by the opponent, an appetite for risk may reach much higher values,
[22] some countries use procedures for assessing and selecting threats according to their tactical situation assessments,
[23] during an emergency to a depth of $60\ \mathrm{mH_2O}$,
[24] the application of neon also seems possible,
[25] above 1% but not more than 3%,
[26] Decompression Sickness,
[27] because the most common way to intensify decompression is to use possibly high oxygen partial pressures,
[28] for example, rest time before diving or undisturbed sleep in the night before diving,
[29] irrespective of the time of stay at it,
[30] an interesting solution could be the use of Neox,
[31] for instance, when entering a diving bell,
[32] Human Factors,
[33] Ventilatory Equivalent for Oxygen,
[34] in the sense of physical or mental phenomena subject to experimental cognition,
[35] the divers were conventionally classified as "delicate" and "resistant" to the conditions of strenuous decompression,
[36] current attitude to diving,
[37] resistance to panic, melancholy, depression or resignation is not comparable to the ability to soberly assess the situation, make clear use of the knowledge resources and take effective action under stressful conditions,
[38] eyes are ‘the mirror of the soul’,
[39] muscle tension or tremor can be checked in passing while checking the equipment by touching the diver's muscles or placing a hand on his/her shoulder,
[41] not only heart rate but also pulse volume,
[42] verifying that the diver remembers and has easy access to valves, switches, watch, panel, knife, etc.,
[43] decompression does not end with reaching the surface, but a state of equilibrium with the respiratory atmosphere is achieved through slow isobaric decompression, after saturated dives the process is the longest,
[44] up to one hour after completing previous decompression,
[45] more than one hour from the completion of previous decompression,
[46] clearance time,
[47] it does not have to be an air atmosphere, because the diver can breathe on the surface, for example from an oxygen inhaler,
[48] it ensures, for instance, being able to reach for a mouthpiece that has escaped from the mouth, access to valves, possibly floating lines, vegetation that may entangle the diver, etc.,
[49] in water bodies the temperature in the water layers can stratify, in the thermocline the temperature changes quickly with a change in depth,
[50] for example, during transport activities or when resting on the beach,
[51] Standard Operating Procedures,
[52] vasoconstriction,
[53] 6.0N oxygen is on the market, which means 99.9999% oxygen in the gas,
[54] although, in this case too, the content of impurities increases with the increase in ‘dead spaces’,
[55] washout period,
[56] washing of the breathing space of the diving apparatus while at the bottom is undesirable due to the direct proximity of a mine or diver detection and combating systems,
[57] for example, it is easier for a diver to double the predicted time of oxygen decompression and to complete it with the use of an operational mixture in the event of a failure of oxygen supply than to calculate this time according to a different formula,
[59] the diver omits a part of the decompression and, after the ascent and a limited time on the surface, is compressed again and subject to further decompression in the decompression chamber,
[60] thus making it more conservative,
[61] artificial extension of stay time at the bottom,
[62] this technology variant takes into account stressful situation such as when a diver has for example to operate in sea currents,
[63] Treatment Tables,
[64] such as passing the oxygen tolerance test,
[65] in the case of recreational dives the risk is usually specified at the level $\mathrm{p} = 1\%$ and for combat dives at $\mathrm{p} \leq 5\%$ with significance $\alpha = 0.01$,
[66] outside the saturation zone expending more effort is dangerous,
[67] rest will be necessary for the performance of mine work or caused by tactical situation connected with the need to reduce noise emission, but in such a case the problem of an increased risk of central oxygen toxicity should be considered,
[68] for example, with an open circuit of the breathing mix,
[69] for example, in the form of additional devices taken by a diver or suspended in the water depths,
[70] many additional elements of the system can be added, such as a communication subsystem increasing mental comfort, having a significant impact on decompression processes,
[71] speeding up,
[72] for instance, in the case of oxygen supply failure,
[73] additional rebreathers suspended in water or carried by a diver,
[74] according to Canadian practice, but in Poland an interval of up to 5 minutes was allowed,
[75] in such a case there is a much greater certainty that the diver will reach the decompression chamber on time,
[76] such designs are common for cable-supplied breathing systems, such as Polycom 101 manufactured by Drägerwerk AG Lübeck,
[77] for example, exposure to nitrogen narcosis,
[78] for example, during descent and staying at the bottom, Trimix will be used and in the decompression process it will be replaced with Nitrox and later with oxygen,
[79] the partial pressures of gas components of the breathing mix $(\mathrm{p_1}..\mathrm{p_j}, \mathrm{p_i})$ do not always have to change smoothly with a change in the depth H, because a rebreather can implement an algorithm to maintain a constant partial pressure of a given gas through an adapted change in its content during a change in pressure, such as devices achieving a constant partial pressure of oxygen $\mathrm{p_i}$ (p_1..p_j,p_i): Mk15/16,
[80] this does not apply to dives from the saturation plateau,
[81] the supply of oxygen can also be achieved by delivering it to the circuit together with other components of the breathing mix,
[82] for example, flinching during a panic attack,

[83] an actuating element of an automation system that performs a predefined process of reaction to forced action,
[84] often under electronic control,
[85] decrease of respiratory action in trained athletes in relation to the average,
[86] heart rate decrease in trained athletes in relation to average; this effect is amplified in the case of immersion in water (as opposed to immersion in virtual environments, art or culture),
[87] what is meant here is not diving training, but adaptive training for other activities,
[88] in real-life conditions, such verification has thus far been difficult to implement,
[89] the technology should have a declared appetite for risk that directly results from the tactical context,
[90] External/Auxiliary Breathing System, emergency breathing system: "pony", etc.,
[91] due to thermal protection preventing cooling and overheating and thus influencing the risk of central oxygen toxicity CNSyn,
[92] analysers of oxygen partial pressure / composition and carbon dioxide content were developed as optional equipment for the SCR CRABE SCUBA rebreather,
[93] the theory and practice of using equipment and instruments to achieve the intended purpose,
[94] Mine Countermeasure,
[95] Explosive Ordnance Disposal,
[96] Improvised Explosive Device Disposal,
[97] Mine Countermeasures Vessel,
[98] Autonomous Underwater Vehicle,
[99] Unmanned Undersea Vehicles,
[100] Remotely Operated Underwater Vehicle,
[101] i.e. a reconnaissance vehicle operating from the vessel,
[102] Autonomous Surface Vehicle,
[103] Network Centric Warfare,
[104] MCMV usually need shielding ensured by other classes of ships and aircraft,
[105] MCM divers can, for example, be used to: to release entangled MCMV equipment, to prepare to extract exercise torpedoes fired by submarines, to harvest or destroy undetonated self-propelled or dropped explosive devices, etc.,
[106] also secretly, for example, by submarines,
[107] for instance, of the infrastructure securing against reconnaissance or landing operations,
[108] Unexploded Ordnance,
[109] diving technology for such activities should differ from typical military and training technology,
[110] e.g. by rapid pulling back by a fast boat, blowing out with a blow directed from a special cannon, etc.,
[111] for example, underwater air curtains or water sleeves, lining with rubber, shock wave damping plastic, used on land,
[112] activities involving the destruction of electronics or the jamming of internal and external signals,
[113] wooden plastic pegs, lead bullets, water stream, etc.,
[114] Explosively Formed Penetrator,
[115] Assuming, as an alternative variant of the operation, a strike with the introduction in the first line of units capable of launching elongated charges and burning the access routes or blocking the passageways by air or rocket force strike in order to burn the crossing. However, the impact exposes the operation to the necessity of undertaking a combat for which the opponent may be prepared. Opponent forces are able to detect and counteract attack line forces or aerial attacks. In addition, it is not possible to maintain secrecy until the landing has taken place. In addition, if significant losses are incurred, then despite a successful breakthrough, occupying the defended area or conducting a pursuit may not have a chance of success. Consideration of using SRT or MCM troops to secretly identify and mine obstacles, despite about 100% of the risk associated with the lack of possibility to recover the subdivision of divers, if there is a probability of completing the task with 70% confidence at 95% confidence level it seems justified from the point of view of economics of conducting combat operations, provided that the possible detection of underwater activity can be immediately compensated by the implementation of the breakthrough variant,
[116] Very Shallow Water,
[117] for instance, in the form of a floating ring,
[118] for example, having the ability to move or bury,
[119] approximately 35 years ago,
[120] the use of statistical models was reserved only for the validation process,
[121] it was difficult to choose such a tactic, as it is widely held that it is impossible to develop sufficiently accurate and reliable deterministic models for such a complex human-machine interaction system as is the case with diving,
[122] a typical analytical approach was applied, which requires a synthesis of the developed models and validation with the use of a statistical model,
[123] most often related to the volume of ventilated space,
[124] ε –breathing module is the ratio of oxygen consumption to lung ventilation $\varepsilon(\mathrm{H}) = \dot{\upsilon}/\dot{\mathrm{v}}_{\mathrm{E}}$ related to diving depth H,
[125] at least several may be recommended: neo-haldanian, RGBM, VPM etc.,
[126] the ratio of consumed oxygen stream $\dot{\mathrm{v}}$ to ventilation stream $\dot{\mathrm{V}}_{\mathrm{E}}$: $\varepsilon = \frac{\dot{\mathrm{v}}}{\dot{\mathrm{V}}_{\mathrm{E}}}$,
[127] repeatability and reproducibility with assumed accuracy at the assumed significance level,
[128] similar, for instance, to the role of ventilated volume in the ventilation model for a submarine [14],
[129] the representativeness of the group is limited to divers meeting the criteria for military divers and those who can perform the role of experimental divers,
[130] in relation to oxygen content in the premix supplied into the breathing space,
[131] for stabilised respiratory parameters of a diver,
[132] biodiversity,
[133] Human Factors,
[134] for anaerobic organisms it is a lethal toxic agent,
[135] symptoms similar to lung burning with chemicals,
[136] in relation to central nervous system,
[137] reduced red blood cell count, decreased vital lung capacity, oxygen induced blindness, etc.,
[138] Central Nervous Syndrome,
[139] this theory forms the basis for epidemiological research, research into
mortality and biodiversity, machine reliability, risk analysis, etc.,
[140] a return to the state preceding the oxygen exposure, consisting in deactivation of potentially dangerous reactive oxygen compounds by biochemical mechanisms as a result of exposure to high partial pressures of oxygen,
[141] commonly used in computer programmes for planning civil technical dives [36],
[142] considered dangerous to a wide range of divers,
[143] possibility of performing decompression at the last station at the depth of 6 mH_2O, possibility of omission of oxygen decompression, possibility of additional effort load, taking into account previous dives, taking into account the type of transport, taking into account low temperature dives, etc.,
[144] such deviations occur when a diver has a significantly developed muscle tissue compared to typical, for this reason one diver was rejected,
[145] Treatment Tables,
[146] as military dives are carried out in pairs,
[147] reproducibility and repeatability,
[148] for example, in the diver's physical preparation, reduction of the effectiveness of flushing the respiratory space of the rebreather, inappropriate preparation of breathing mixes or deterioration of their required quality, inappropriate packing of the scrubber or reduction of its quality parameters, etc.,
[149] the occurrence of rare medical conditions or diseases,
[150] most of the elements of the system allowing for the implementation of the project constitute the laboratory base of the Naval Academy described below,
[151] implementation of domestic diving technology was due to the lack of certain procedures required by tradition and national law which is not in place for diving technology supplied with the rebreather, as referred to below,
[152] Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats,
[153] CPBR 9.5 implementation objective 31 technical, medical and legal problems of human long-term presence under water at a depth of 120 m.,

[154] CPBR 9.2 objective 17.07 Development of a system of saturated exposures in the zone up to 100 m and the principles of the research and medical security of divers,
[155] in the case of independent deep water dives, it is important to take into account the possibility of the diver ascending rapidly from considerable depths,
[156] causal,
[157] even in peace conditions, divers need to perform the mine patrolling duty,
[158] as indicated in the tactical context description,
[159] cost-oriented FMEA [37],
[160] here understood as ambiguous,
[161] additional work of soldiers outside their duty hours is legally permissible,
[162] for example: acidification of the body caused by strenuous training, presence of alcohol in the body, sleep deprivation, etc.,
[163] breathing mix supplied in the rebreather,
[164] Standard Operating Procedures,
[165] Good Laboratory Practice,
[166] impact,
[167] it also seems possible to apply neon,
[168] above 1% but not more than 3%,
[169] in real-life conditions, such verification has so far been difficult to implement,
[170] prediction,
[171] a natural example can be such as learning of weather processes occurring in the system atmosphere that allows to predict weather phenomena with sufficient repeatability and satisfactory precision,
[172] sufficiently precise and reproducible for the intended use,
[173] scientifically based predictions of pathways for future processes or changes in system characteristics,
[174] Critical to Quality.